

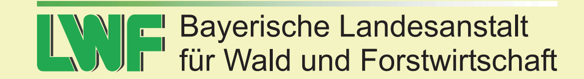
Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe

11

Berichte aus dem TFZ

Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren

Projektpartner

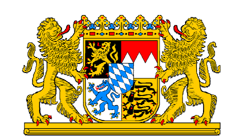




TFZ

Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren

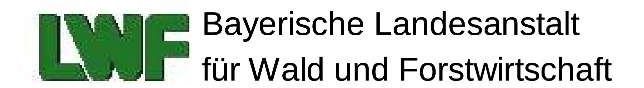
Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe



Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren

Alexander Höldrich (TFZ)
Dr. Hans Hartmann (TFZ)
Thomas Decker (TFZ)
Klaus Reisinger (TFZ)
Wilfried Sommer (LWF)
Markus Schardt (TFZ/LWF)
Dr. Stefan Wittkopf (LWF)
Dr. Gunther Ohrner (LWF)

Projektpartner



Berichte aus dem TFZ 11

Straubing, Juli 2006

Titel: Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren

Bearbeitung: Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Schulgasse 18, D-94315 Straubing
Projektleitung und Endberichtsredaktion: Dr. Hans Hartmann

Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF),
Am Hochanger 11-13, D-85354 Freising
Leitung Teilprojekt LWF: Dr. Gunther Ohrner

Autoren TFZ: Alexander Höldrich
Dr. Hans Hartmann
Thomas Decker
Klaus Reisinger
Markus Schardt (bis 2004)

Autoren LWF: Wilfried Sommer
Markus Schardt (ab 2005)
Dr. Stefan Wittkopf
Dr. Gunther Ohrner

Auftraggeber: Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten (StMLF)
(Förderkennzeichen N/02/16)

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei Autoren, die im Inhaltsverzeichnis den jeweiligen Kapiteln separat zugeordnet sind.

ISSN: 1614-1008

Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe
Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de
Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Dr. H. Hartmann
Verlag: Eigenverlag TFZ
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2006
Gestaltung: Dr. H. Hartmann, H. Sporrer

Fotonachweis: Fotos: Höldrich
Titelbild: Sägespaltmaschine am Biomassehof Allgäu in Kempten

Danksagung

Die Autoren möchten sich für die vielfältige Unterstützung bedanken, die allen Projektbearbeitern von vielen Seiten gewährt wurde. Besonderer Dank gilt den vielen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik (ILT) innerhalb der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Sie haben die am gleichen Ort angesiedelte ehemalige Dienststelle des TFZ in Freising-Weihenstephan bei der Projektdurchführung durch personelle und maschinentechnische Hilfe und durch grafische Arbeiten (Frau Heike Eismann) durchgehend hervorragend unterstützt. In gleicher Weise bedanken wir uns auch beim benachbarten Lehrstuhl für Landtechnik des Wissenschaftszentrums Weihenstephan der TU-München, insbesondere bei Herrn Dr. Stanzel, für die wertvolle und intensive Beratung bei der Festlegung und Beschaffung der geeigneten Messmittel insbesondere für den Lagerungsversuch.

Besonderer Dank gilt auch dem Biomassehof Allgäu in Kempten, namentlich den Herren Romer, Müller und Herzner, die beim Aufbau und bei den Messungen zum Lagerungsversuch vielfältige Hilfestellungen einschließlich maschinentechnische Unterstützung leisteten. Das Gleiche gilt für die Versuchsstation Dürnast des Wissenschaftszentrums Weihenstephan (TU-München), besonders dem Versuchsstationsleiter, Herrn Weindl, auf dessen Betriebshof ein großer Teil der Lagerungsversuche durchgeführt werden konnte. Auch ihm sind wir zu Dank verpflichtet.

Der Lehrstuhl für Arbeitswissenschaft und angewandte Informatik des Wissenschaftszentrums Weihenstephan, namentlich Herr Ekkehard von Bodelschwingh, leistete wertvolle Unterstützung bei der Auswahl und Beschaffung einer geeigneten Zeitstudien-Software, auch ihm gilt besonderer Dank.

Die Durchführung der Befragung von Selbstwerbern wurde mit Unterstützung der Mitarbeiter des ehemaligen Forstamtes Freising durchgeführt. Ihnen, wie auch der Vielzahl von Betriebsleitern und den Probanden, die ihre Arbeitsabläufe vor den "Augen" der Zeitmessung vollzogen, möchten wir besonders danken.

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1 Einleitung

Trotz aller Anstrengungen, die energetische Biomassenutzung in zentralen Konversionsanlagen für die (Nah-)Wärme- oder gar Stromerzeugung zu forcieren, bleibt der größte Teil der Holznutzung auch weiterhin dem privaten oder kleingewerblichen Bereich vorbehalten. Hier sind es vor allem die privaten Haushalte, die sich – falls eine Holzfeuerung verwendet werden soll – in der überwiegenden Zahl aller Fälle für eine Scheitholzheizung entscheiden. Oft handelt es sich dabei nicht einmal um Zentralheizungssysteme, sondern um Einzelfeuerstätten als Zusatzheizung, die auch bei Neubauten vielerorts standardmäßig vorgesehen sind oder einfach nur im vorhandenen Gebäudebestand "wiederentdeckt" werden. In diesem Anwenderbereich dominiert vor allem das Scheitholz, welches mit relativ geringem technischen Aufwand beschafft und aufbereitet, kostengünstig und verlustarm bevorratet und in relativ einfachen Anlagen zur Raum- oder Zentralheizung verwendet werden kann. Scheitholz ist somit der Hauptbrennstoff innerhalb der Brennstoffkategorie "Brennholz", welche mit ca. 45 % den größten Einzelbeitrag zum Bioenergieaufkommen Bayerns leistet (Abbildung 1).

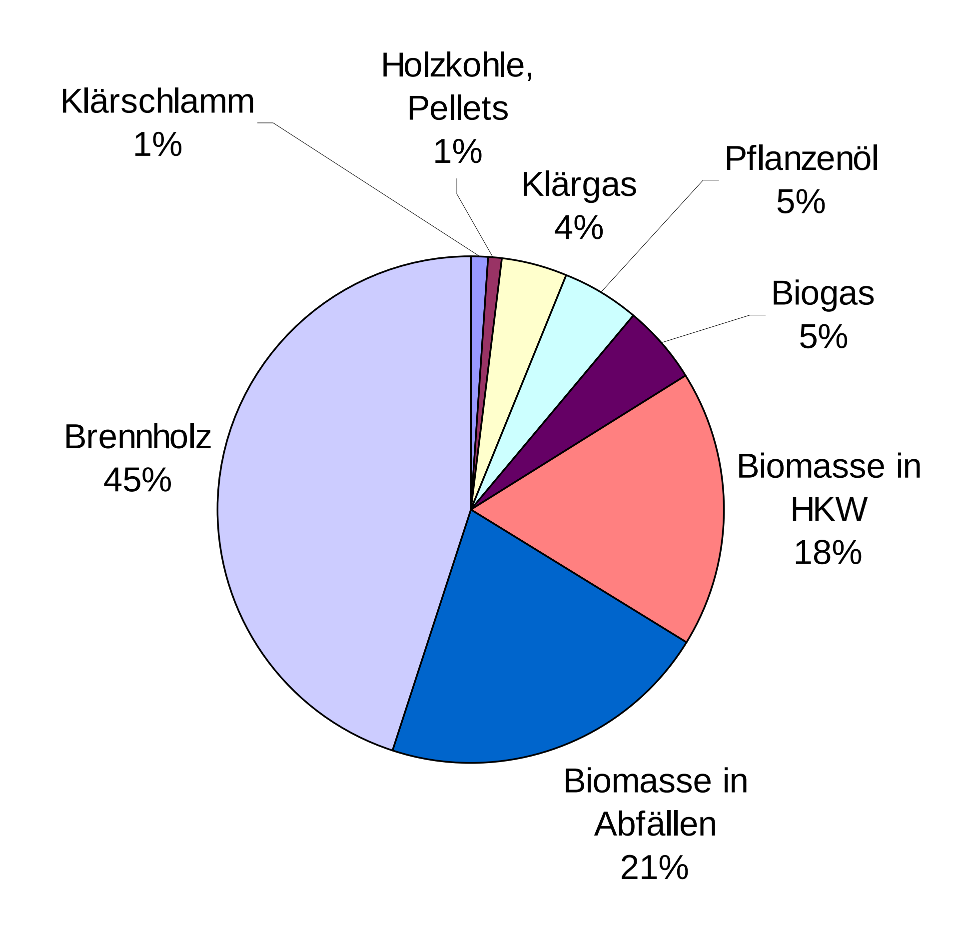


Abbildung 1: Biomassemix in Bayern 2002 (nach [7])

Die Ursachen für die anhaltend hohe Bedeutung dieses traditionellen Energieträgers sind vielfältig. Bei den Einzelfeuerstätten (z. B. Kachel- und Kaminöfen) erhält neben traditionellen Gewohnheiten auch der Aspekt der Wohnwertsteigerung zunehmende Bedeutung, zumal derartige

Feuerungen in letzter Zeit über die meist vorhandene Sichtscheibe auch eine Beobachtung des Brennraumes und des Flammenspiels erlauben.

Zum anderen möchten die Anwender unabhängiger von den bisherigen Energiequellen werden. Vielfach spielt dabei auch der Wunsch nach einer Notversorgung bei Stromausfall eine Rolle. Diese Motivation wurde zuletzt auch durch die Meldungen über winterbedingte mehrtägige Stromausfälle im Münsterland in 2005 und durch entsprechende Ereignisse in Nordamerika weiter verstärkt. Auch Freizeitaspekte werden häufig genannt, die Arbeiten im Wald bei der Selbstwerbung und das Aufbereiten zu Scheitholz werden vielfach auch als Bewegungsausgleich für sitzende Tätigkeiten aufgefasst, so dass die dabei aufgewendete Arbeitszeit nicht notwendigerweise als Kostenfaktor anzusehen ist. Je größer allerdings die verbrauchte Brennholzmenge ist, desto mehr wird aber auch bei der Brennholzbeschaffung auf Arbeitseffizienz und Wirtschaftlichkeit geachtet.

Bei Scheitholz-Zentralheizungen, deren Betrieb einen deutlich größeren jährlichen Brennstoffbedarf verursacht als der Betrieb von Einzelraumfeuerungen, spielen die Fragen der Wohnwertsteigerung und der Absicherung bei Stromausfall meist keine entscheidende Rolle mehr. Hier geht es verstärkt um wirtschaftliche Vorteile, die mit dem Holzeinsatz verbunden sind, zumal heutige Scheitholzvergaserkessel einen Entwicklungstand erreicht haben, der einen effizienten, störungsfreien und relativ schadstoffarmen Betrieb ermöglicht [22]. Als wesentliche Entwicklungen sind hier insbesondere die Kombination mit gut dimensionierten Pufferspeichern und die Regelungstechnik zu nennen.

Zu Ausgabenminderungen und Kostenvorteilen kann es vor allem dann kommen, wenn zunehmend teurere konventionelle Wärmeenergieträger, wie Heizöl oder Erdgas, durch günstigeres Holz ganz oder teilweise ersetzt werden. Selbst bei einem Ankauf von Scheitholz zu üblichen Marktpreisen kann ein solcher wirtschaftlicher Anreiz gegeben sein. Das zeigt ein einfacher Vergleich der Energieträgerkosten in Abbildung 2, darin beträgt der Preisabstand von ofenfertig angeliefertem Scheitholz zum Heizöl für den Endverbraucher zu Jahresbeginn 2006 4,2 ct/kWh.

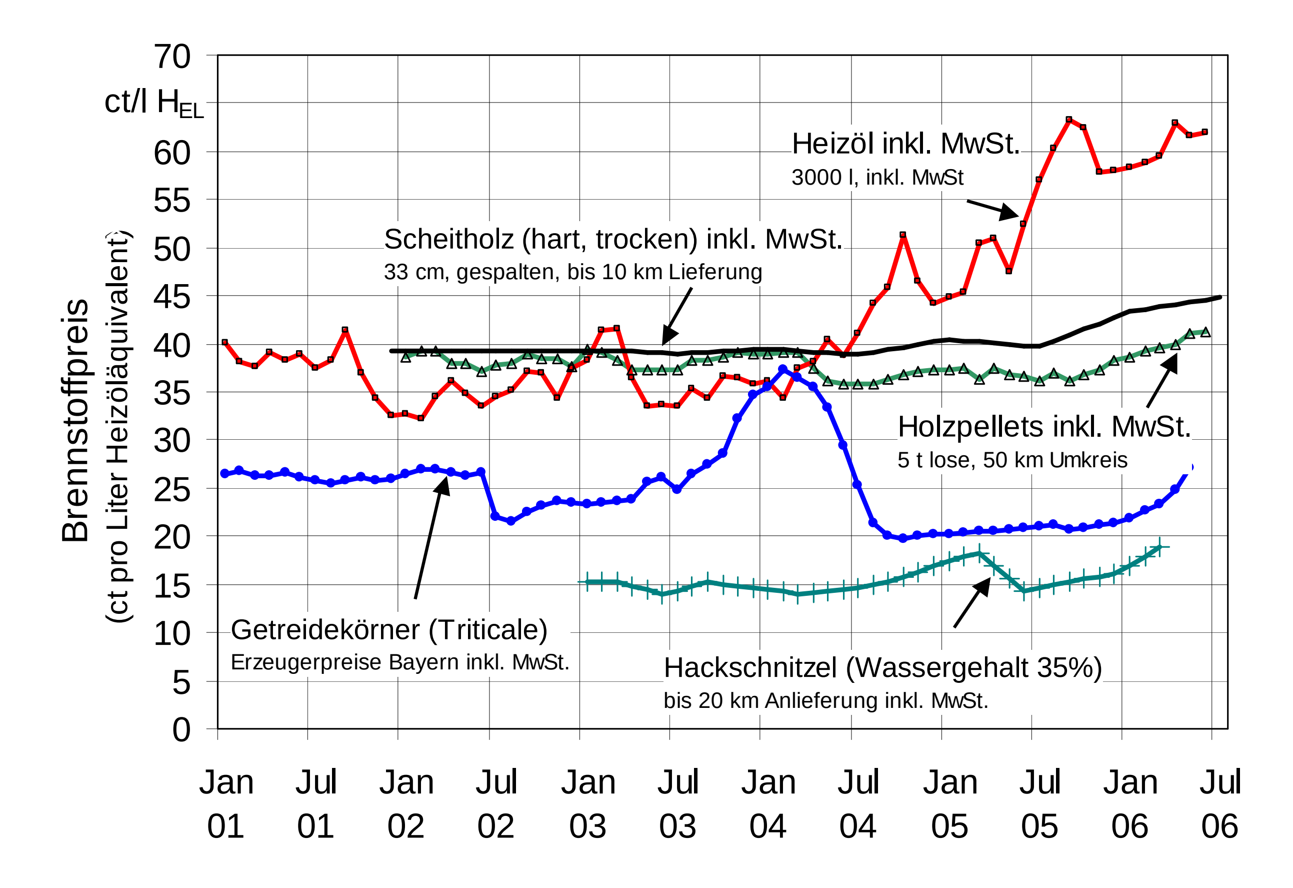


Abbildung 2: Preisverlauf von Biomasse-Festbrennstoffen und Heizöl, umgerechnet in Cent pro Liter Heizöläquivalent. Datenquellen für Heizöl: Tecson [53] (Monatsmittelwerte), Holzpellets/Hackschnitzel: CARMEN e.V. [12] Scheitholz: eigene Erhebungen TFZ (vgl. Kapitel 7). Preise inklusive der jeweiligen Mehrwertsteuer, sofern erhoben

Noch größer sind die Kostenvorteile, wenn nicht zugekauftes Scheitholz verwendet wird, sondern eine Beschaffung aus eigenem oder fremden Waldbesitz mit ggf. eigener Aufbereitung gegeben ist. Diese "kostenlose Beschaffung" stellt auch heute noch die überwiegende Rohstoffquelle der Haushalte in Deutschland dar (Abbildung 3). Nur eine Minderheit "kauft" den Brennstoff zu, wobei in diesem Fall der Forstbetrieb und Privatbezug deutschlandweit als wichtigste Bezugsquelle zu nennen sind (Abbildung 3). Neuere Zahlen zeigen, dass der "kostenlose Bezug" abnimmt; für Gesamtdeutschland wird er in 2005 nur noch mit 55 % angegeben [3]. Hier wirkt sich offenbar der insgesamt steigende Holzverbrauch dahingehend aus, dass die neuen Nutzer von Brennholz oft keine Möglichkeit oder keine Bereitschaft zur Selbstwerbung im Wald besitzen und daher auf Fremdbelieferung angewiesen sind. Das zeigt auch der für 2005 genannte Marktanteil des "Handels" und der "Märkte", der in Summe für Gesamtdeutschland mit 11 % angegeben wird [3]. Anders als in Abbildung 3 bezieht sich diese Angabe auf den gesamten Scheitholzverbrauch und stellt somit eine Steigerung gegenüber 2003 dar.

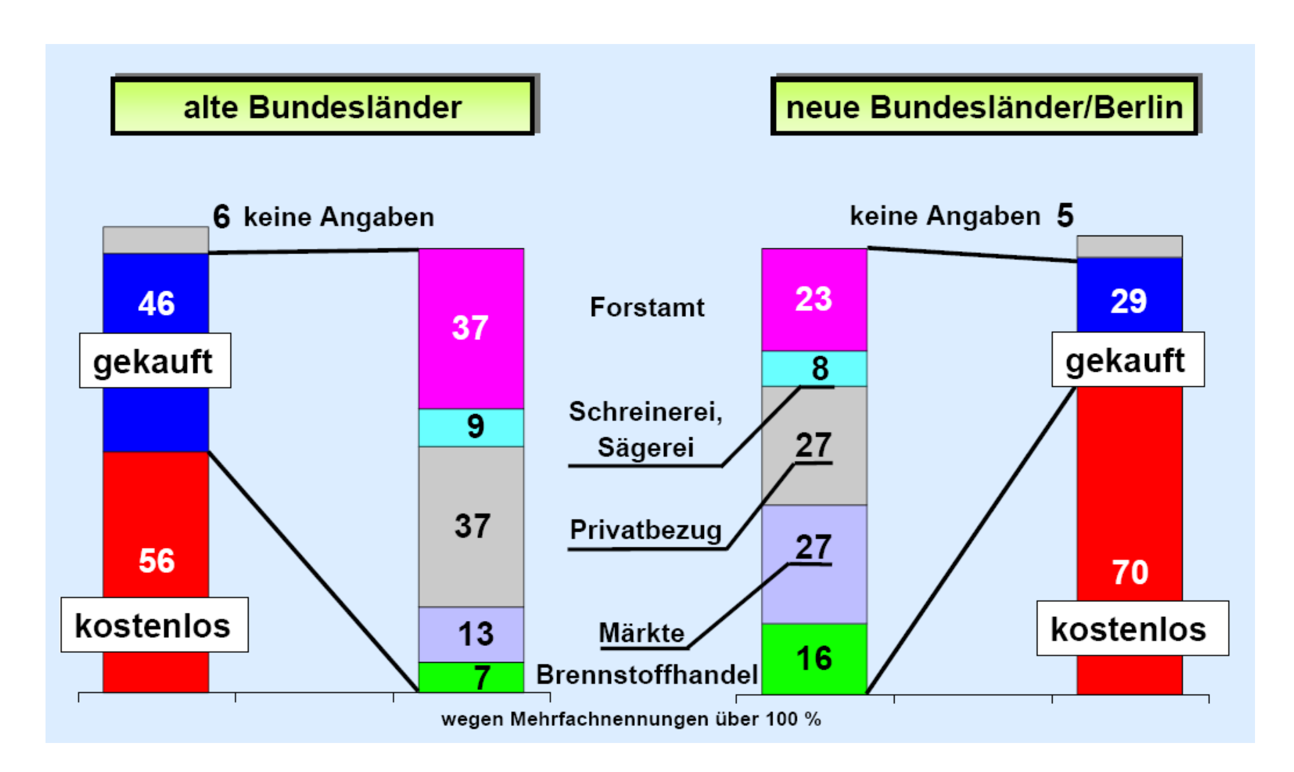


Abbildung 3: Bezugsquellen für Holz in 2003. Angaben der Haushalte mit Holzeinsatz in Prozent [1]. Grafik: Rheinbraun Brennstoff GmbH. Datenquelle: GFK Panel Services, Nürnberg

Der Gesamtverbrauch an Scheitholz in Deutschland wird für 2005 mit 12,98 Mio. t angegeben, wobei gegenüber 2004 lediglich ein 2%iger Anstieg festzustellen ist [3], obgleich angesichts des danach eingetretenen starken Anstiegs der Heizölpreise hier auch eine größere Steigerung zu erwarten gewesen wäre. Hierin ist auch ein Beleg für die Tatsache zu erkennen, dass das Scheitholzangebot bisher offenbar sehr unelastisch auf eine mutmaßlich gestiegene Nachfrage nach ofenfertigem Brennstoff reagiert. Vermehrte Meldungen über Scheitholzknappheit im Scheitholzhandel und ausverkaufte Lager bereits im Herbst 2004 und 2005 belegen diese Behauptung.

Der Grund für diese geringe Flexibilität des Holzangebotes ist vielschichtig. Zum einen ist er in der Tatsache zu sehen, dass für Scheitholz eine ca. 1- bis 2-jährige Lagerdauer gefordert wird, weshalb eine Nachfragesteigerung nach ofenfertigem Holz frühestens nach ca. zwölf Monaten angebotswirksam werden kann, zumal Trocknungsanlagen für Scheitholz, die einen Nachfrageüberhang relativ kurzfristig ausgleichen könnten, derzeit kaum existieren.

Zum anderen handelt es sich bei der Scheitholzbereitstellung meist immer noch um eine relativ arbeitsintensive Produktionsweise, so dass die Ausweitung des Angebotes oft an der Verfügbarkeit von preiswerten Arbeitskräften scheitert. Hinzu kommt, dass es sich meist um eine vergleichsweise schwere Arbeit handelt, bei der eine Produktionsausweitung oft auch an physische Grenzen stößt. Der relativ große Lagerraum bzw. die Lagerfläche, die für die Bevorratung größerer Mengen erforderlich ist, stellt ebenfalls einen limitierenden Faktor dar.

2 Problemstellung

In den letzten Jahren ist ein Ansteigen der Nachfrage für Scheitholz als Brennstoff erkennbar. Das führte unter anderem dazu, dass "ofenfertiges" Scheitholz bei den meisten Anbietern schon vor Beginn des Winters ausverkauft war, so dass keine weitere Ware mehr für die Deckung der gestiegenen Nachfrage bereit stand und auch kurzfristig nicht mehr beschafft werden konnte, da eine Warmlufttrocknung von Scheitholz in der Praxis eher eine Ausnahme darstellt. Tendenziell führt diese Marktsituation zu einer Verteuerung des Brennstoffs, die sich seit etwa drei Jahren schon abzuzeichnen beginnt (vgl. Abbildung 2) und auch bei einem Vergleich mit einer Preisermittlung im Jahr 1997 [26] festzustellen ist.

Diese bisherigen und zukünftig zu erwartenden Preiserhöhungen sowie der aktuelle Nachfrageüberhang sind plausibel angesichts der Tatsache, dass die Herstellung von Scheitholz nach wie vor oft noch mit hohem Arbeitszeitaufwand und relativ geringem Mechanisierungsgrad erfolgt. Hinzu kommt, dass das Waldeigentum zu über 60 % [49] mit landwirtschaftlichen Betrieben verbunden ist, in denen der Arbeitskräfteeinsatz im Zuge des laufenden landwirtschaftlichen Strukturwandels immer mehr abgenommen hat. Somit kann die Aufrechterhaltung oder gar Ausweitung der bisherigen Scheitholzproduktion nur durch zunehmende Rationalisierung der Produktion erfolgen. Durch Einführung bzw. Verbreitung effizienter und rationeller Bereitstellungsverfahren könnte die beobachtete Steigerung der Scheitholznachfrage zukünftig auch zu vernünftigen Preisen befriedigt und somit Versorgungsengpässe vermieden werden.

Da es sich bei der Scheitholzbereitstellung um eine besonders feingliedrige Verfahrenskette mit einer großen Anzahl von Teilverfahrensschritten handelt (z. B. Holzernte im Wald, Rücken, Stapeln, Laden, Transportieren, (Zwischen-)lagern, Trocknen, Spalten, Sägen, Umschlagen, Endtransport, Endablage), sind viele Eingriffsmöglichkeiten und Optimierungsansätze möglich. Die Bereitstellung kann auf unterschiedliche Art erfolgen (Abbildung 4). Dies zeigt sich schon bei der Holzernte, die mit unterschiedlichen motormanuellen Verfahren und darüber hinaus auch mittels eines Harvesters durchgeführt wird. Das Rücken, also das Befördern des Holzes aus dem Bestand an die Waldstraße, kann ebenfalls unterschiedlich gestaltet werden: von Hand, mit Pferden, teilmechanisiert unter Zuhilfenahme einer Seilwinde oder sogar vollmechanisiert mit einem Forwarder. Die Aufarbeitung wie die Lagerung kann am Waldweg, am Aufarbeitungsplatz oder beim Kunden geschehen. Sie kann traditionell mit Motorsäge, der Axt oder einem Spalthammer ausgeführt werden oder mit kleinen oder großen hydraulischen Spaltern und weiter auch mit großen oder kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschinen. Für den Transport werden LKW, Traktorengespanne oder PKW mit Anhänger verwendet. Bei der Lagerung kann das Scheitholz geschichtet oder geschüttet, abgedeckt oder nicht abgedeckt sein.

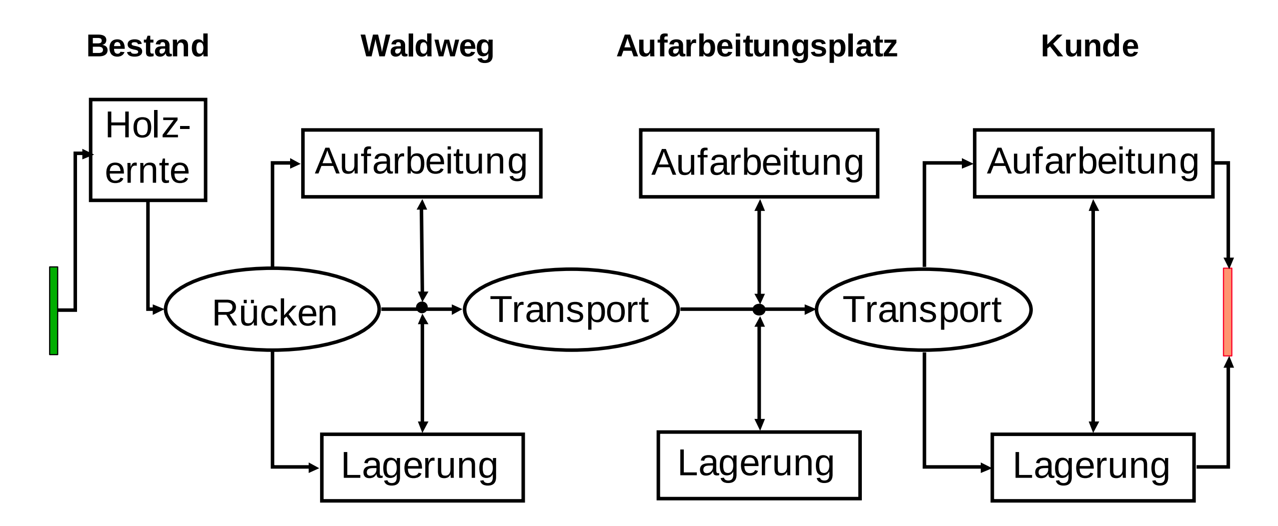


Abbildung 4: Schema der unterschiedlichen Logistikpfade bei der Bereitstellung von Scheitholz

In der Ausgestaltung der Verfahrenskette und gegebenenfalls der weiteren Mechanisierung liegen somit beträchtliche Möglichkeiten für eine Optimierung und damit Kostensenkung und Produktivitätssteigerung der Scheitholzproduktion. Die Bewertung und Identifikation solcher Möglichkeiten erfordert allerdings eine differenzierte Bestandsaufnahme der Bewertungskenngrößen für die einzelnen Verfahrensabschnitte und Anwendungsfälle. Beispielsweise sind hierfür konkrete Planungszahlen für eine Beurteilung des Arbeitszeitbedarfs bzw. der Produktivität der Brennholzernte und -aufbereitung sowie des Brennholzumschlags und des Transports je nach betrachtetem Mechanisierungsverfahren erforderlich. Auch zum Energieverbrauch werden geeignete holzmengenspezifische Planungszahlen benötigt. Derartige Daten liegen jedoch für die Scheitholzproduktion derzeit nicht vor.

Ebenso wenig kann zur Zeit objektiv festgestellt werden, in wie weit die einzelnen Produktionsverfahren mit besonderen körperlichen oder gesundheitlichen Belastungen durch die Schwere der zu leistenden Arbeit verbunden sind bzw. welche Erleichterungen ein erhöhter Mechanisierungsgrad hierbei gegebenenfalls mit sich bringen würde. Auch in der Arbeitsschwere, die gemeinhin als relativ hoch eingeschätzt wird, ist ein Hemmnis für den weiteren Ausbau der Scheitholzproduktion zu sehen, so dass verbesserte Kenntnisse und daraus abgeleitete Optimierungsansätze auch in diesem Bereich wünschenswert sind.

Weitere Unsicherheiten und Kenntnislücken bestehen bei der Lagerung. In Scheitholzfeuerungen ist grundsätzlich trockenes Holz zu verwenden, das heißt, das Holz muss so lange unter geeigneten Bedingungen gelagert werden, dass es bis zur Verwendung auf Wassergehaltswerte von unter 20 % abgetrocknet ist. In diesem Zustand wird es gemäß der neuen Klassifizierungs-Vornorm prCEN/TS 14961 [16] als "ofenfertiges Scheitholz" bezeichnet. Bei der Festlegung der hierfür erforderlichen Lagerdauer herrscht allerdings noch große Unsicherheit, da eine zuverlässige Feststellung des Wassergehalts insbesondere bei Scheitholz schwierig ist. In der Praxis wird als erforderliche Lagerungsdauer eine große Spannweite von Werten genannt; sie reicht von sechs Monaten bis zu drei Jahren.

Nach der Lagerung wird das Holz in der Einheit Raummeter verkauft, wobei es für dieses Maß keine einheitliche Definition gibt. Daher können mit dem Raummeter entweder gestapelte Rundlinge oder gespaltene Meterscheite gemeint sein, auch gestapelte oder sogar geschüttete Kurzscheite werden als Raummeter verkauft, wobei es unzweifelhaft erscheint, dass sich die darin enthaltene Masse (und damit auch die Energiemenge) je nach Sortiment zum Teil deutlich unterscheidet. Einheitlich anerkannte Umrechnungsfaktoren zwischen den Sortimenten fehlen, auch über den möglichen Einfluss der verschiedenen Holzarten auf die Volumenmaße ist nichts bekannt. Für einen zunehmend professionelleren und überregionalen Scheitholzmarkt sind derartige Umrechnungszahlen aber unbedingt erforderlich, da nur dadurch ein objektiver Vergleich der Verkaufspreise für Scheitholz möglich ist.

Für eine Weiterentwicklung des Scheitholzmarktes sind somit zunächst eine Vielzahl von Kenntnislücken zu schließen und geeignete belastbare Planungszahlen zu erarbeiten. Mit dem hier durchgeführten Forschungsprojekt soll dazu ein Beitrag geleistet werden. Das Fehlen solcher systematisch erarbeiteter Daten belegt, dass die Bedeutung des Scheitholzes für die Bioenergienutzung in den letzten Jahren deutlich unterschätzt wurde.

3 Zielsetzung

Ziel der Untersuchung ist die Bewertung und Optimierung von Produktionsverfahren für Scheitholz und die Erarbeitung von hierfür relevanten Planungs- und Kalkulationsdaten. Allerdings handelt es sich bei der Scheitholzproduktion prinzipiell um eine relativ variantenreiche Prozesskette, die zudem vielerlei Einflüssen unterliegt und für die eine Vielzahl von Prozess- und Produktkenndaten zu berücksichtigen sind. Daher ist eine systematische Abgrenzung des Betrachtungsrahmen erforderlich. Hierzu bietet ein sogenanntes "Input-Output-Modell" eine schematische Darstellungsmöglichkeit; in Abbildung 5 wird ein solches Modell auf den Bereich der Scheitholzbereitstellung angewendet. Demnach stellt die Scheitholzbereitstellung einen Produktstrom vom Rohholz zum Endprodukt dar, der grob in die Teilverfahrensschritte Ernte, Aufbereitung, Transport und Lagerung untergliedert werden kann und auf den verschiedene Umwelteinflüsse wirken. Er kann durch diverse Prozesskenndaten beschrieben werden und das Endprodukt Scheitholz ist durch verschiedene Produktmerkmale gekennzeichnet (Abbildung 5).

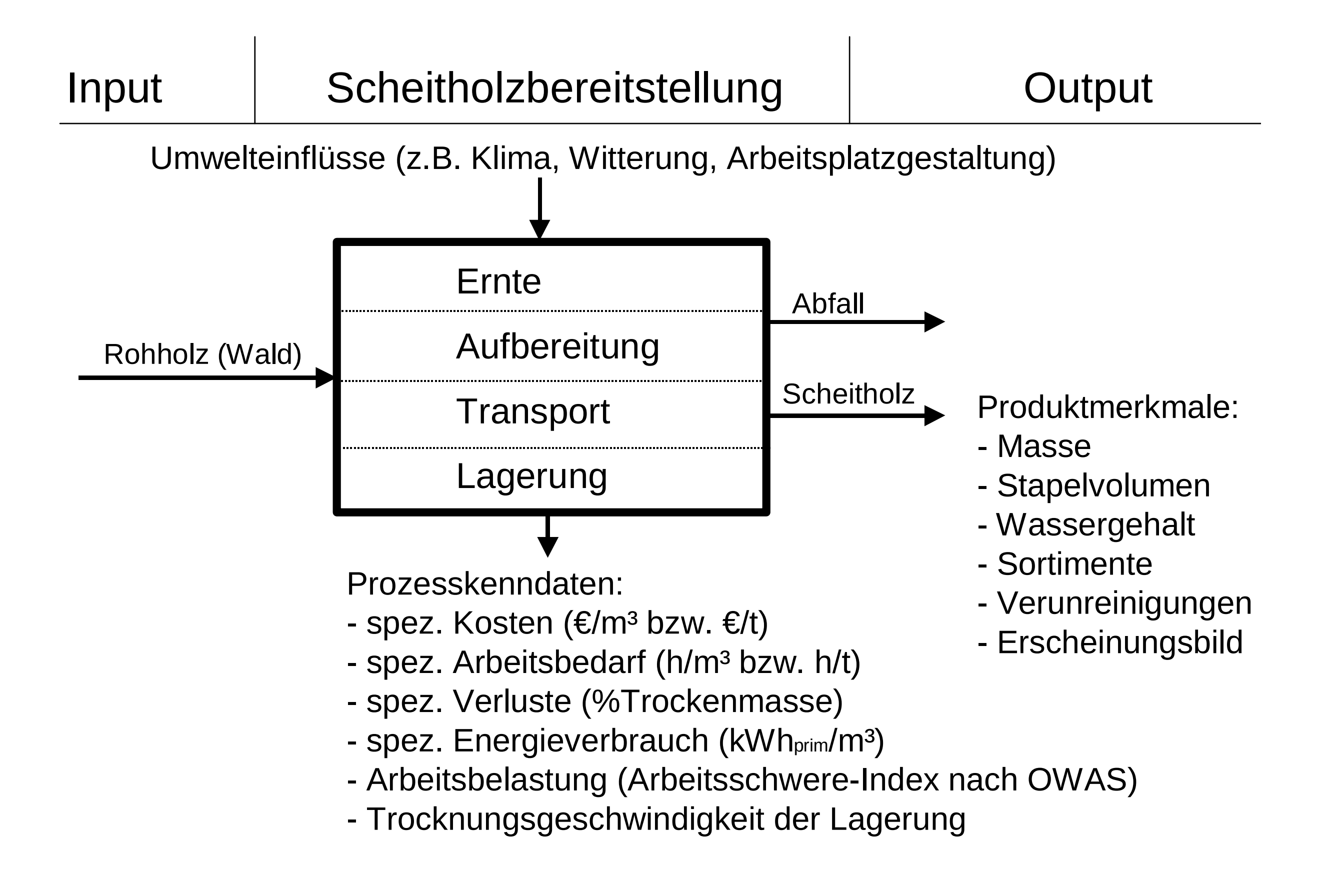


Abbildung 5: Input-Output-Modell für die Scheitholzbereitstellung

Die in Abbildung 5 dargestellten Prozesskenndaten sowie einige der unter "Produktmerkmale" aufgelisteten Parameter stellen den Untersuchungs- und Bewertungsgegenstand in der vorliegenden Arbeit dar. Diese Bewertung soll zum einen separat für die Teilverfahrenschritte der Prozess-

kette durchgeführt werden (z. B. Holzernte im Wald, Spalten mit Senkrechtspalter, Lagerung im Freien), zum anderen soll aber auch für ausgewählte Zielgrößen eine Betrachtung von Modellverfahrensketten, in denen sämtliche Teilverfahrensschritte aggregiert wurden, durchgeführt werden. Dadurch können auch die Auswirkungen einer gewählten Mechanisierung auf die vor und nachgelagerten Verfahrensschritte mit einfließen und es wird eine Gesamtschau vom "Baum zum Ofen" ermöglicht.

Im Einzelnen werden für diese Bewertung die folgenden Zielgrößen ausgewählt, wobei zu den ersten 4 Punkten auch eine Bewertung in verschieden ausgestalteten Prozessketten erfolgen soll.

- Arbeitszeitbedarf
- Arbeitsschwere
- Energieverbrauch
- Kosten
- Trocknungsgeschwindigkeit (bei der Lagerung)
- Trockenmasseverluste (bei der Lagerung)
- Stapelvolumen

Hierbei stellt das Stapelvolumen im eigentlichen Sinn lediglich ein Produktmerkmal dar, es wird jedoch für die Umrechnung von Rohholzmaßen (Festmeter) zu Verkaufsmaßen (z. B. gestapelte Rundlinge, Meterscheite oder geschüttete Kurzscheite) der einzelnen Sortimente benötigt, so dass eine nach Holzarten und Sortimenten differenzierte und belastbare Feststellung der Umrechnungsfaktoren hier ebenfalls erfolgen muss, da für die Praxis aber auch für die hier durchzuführenden Berechnungen sonst keine geeigneten Daten verfügbar sind. Weitere mögliche Prozesskenndaten wie die Lärmbelastung oder zusätzliche Umwelteffekte (z. B. Bodenbelastung) werden dagegen hier vereinfachend nicht betrachtet.

Für die oben genannten Zielgrößen sollen nach Möglichkeit produktmengenspezifische Kenndaten bestimmt werden, das heißt, dass bei den Messungen und Erhebungen in der Praxis stets auch der Massenstrom (d. h. die Brennholzproduktion) mit zu erfassen ist, auf den sich die Messungen letztlich beziehen sollen. Für die Messgröße Energieverbrauch bedeutet dies beispielsweise, dass letztendlich der spezifische Energiebedarf je Maßeinheit Brennstoff bestimmt werden soll.

Die Abhängigkeit der Zielgrößen von bestimmten Umwelteinflüssen (Abbildung 5) soll teilweise ebenfalls mitberücksichtigt werden, sofern dies mit vertretbarem Aufwand möglich ist. Dies ist beispielsweise bei der Lagerung gegeben, die daher in zwei verschiedenen Klimagebieten Bayerns und in verschiedenen Lagerperioden messtechnisch begleitet wird. Bei der unterschiedlichen Arbeitsplatzgestaltung ist dagegen keine systematische Abstufung möglich, daher kommt es hier eher darauf an, durch eine ausreichend große Anzahl von Praxismessungen eine repräsentative Aussage für die Mehrzahl der Anwendungen im jeweiligen Mechanisierungsverfahren treffen zu können.

Auch Rohstoffeinflüsse können eintreten (Abbildung 5). In der vorliegenden Untersuchung soll diesem Einfluss dadurch Rechnung getragen werden, dass stets versucht wird, mindestens die Holzarten Fichte und Buche (als Vertreter für die Kategorien Weich- bzw. Hartholz) zu repräsentieren. Außerdem wird der mögliche Einfluss verschiedener Holzdurchmesser bei der Holzernte- und Aufbereitung untersucht.

Den Schwerpunkt der Messungen bilden aber die arbeitswissenschaftlichen Untersuchungen, hier kommt es vor allem darauf an, dass die Aufnahmen den praktischen Betrieb so realistisch wie möglich abbilden und ihn dabei so gering wie möglich beeinflussen, um eine bestmögliche Aussagefähigkeit zu erreichen.

Neben den spezifischen Prozesskenndaten, wie z. B. die Kosten pro Raummeter, soll auch der unspezifische Faktor der Arbeitsbelastung erhoben werden und in die Gesamtbewertung einfließen. Alle Arbeitsabläufe der Scheitholzerzeugung – von den einzelnen Ablaufabschnitten bis hin zu zusammengesetzten Teilverfahren sowie den gesamten Prozessketten – sollen dabei untersucht und mit der OWAS-Methode in sogenannte Maßnahmenklassen eingeteilt werden (OWAS = Ovako Working Posture Analysing System). Dieser abstrakte Index soll nach Möglichkeit eine allgemeinverständliche Zuordnung und Bewertung ermöglichen, so dass daraus Empfehlungen zur Verbesserung einzelner Arbeitsablaufabschnitte abgeleitet werden können.

Beim Teilprozess der Lagerung soll für diverse Randbedingungen, wie beispielsweise Baumart, Standort, Lagergestaltung oder Sortiment, eine Mindesttrocknungsdauer bestimmt werden. Ferner ist auch von Interesse, ob und wie hoch ein Trockenmasseverlust bei einer Lagerung auftritt.

Zusammenfassend soll die vorliegende Untersuchung auf dem wissenschaftlich bislang kaum bearbeiteten Gebiet der Scheitholzbereitstellung wichtige Kenntnislücken schließen und belastbare Planungszahlen erarbeiten, mit denen eine Bewertung und Optimierung der Prozessketten möglich ist. Letztlich soll damit auch einer zukünftig erwarteten Verknappung des Brennholzangebotes bei gleichzeitig steigender Nachfrage begegnet werden.

4 Material und Methoden

4.1 Arbeitszeitbedarfsbestimmung

Nachfolgend werden die bei den Zeitstudien angewandten methodischen Grundlagen und die verwendeten Hilfsmittel dargestellt und erläutert.

4.1.1 Die Methode nach REFA

Zeitstudien zur Arbeitszeitbedarfsbestimmung stellen ein arbeitswissenschaftliches Instrument zur Erfassung und Optimierung von Arbeitsabläufen dar. In der vorliegenden Untersuchung wurde die Methode für forstliche Zeitstudien nach REFA (Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.) angewandt. Hierbei werden die zu untersuchenden Arbeitsabläufe beobachtet und anschließend in Arbeitsablaufabschnitte unterteilt. Diese müssen exakt beschrieben und für jeden Zeitnehmer eindeutig sein. Im weiteren Verlauf werden dann die benötigten Zeiten mit einem Aufnahmegerät erfasst. Zusätzlich ist hierzu aber auch die Erfassung des Materialflusses notwendig, um spezifische Kenngrößen ermitteln zu können, beispielsweise den Arbeitszeitbedarf für einen Raummeter Rundlinge. Da parallel zur reinen Zeiterfassung auch der ebenfalls erfasste Energieaufwand (Kapitel 4.3) sowie Daten zur Belastung der arbeitenden Person (Kapitel 4.2) aufgezeichnet wurden, lassen sich diese Messungen somit einem bestimmten Output (Holzmenge) zuordnen und in Form eines spezifischen Wertes auswerten.

Es wurde versucht, die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeitsstudien im Bereich der motormanuellen Brennholzaufarbeitung möglichst praxisnah zu konzipieren und durchzuführen, wobei die im forstlichen Arbeitsstudium üblichen Methoden verwendet und die Ergebnisse entsprechend ausgewertet wurden. Die den Arbeitsstudien zugrunde liegende Methodik entsprach der von REFA [8] empfohlenen Vorgehensweise. Die beobachteten Zeiten wurden mit mobilen Datenerfassungsgeräten festgehalten. Hierzu wurden Handheld Computer (Pocket-PC's von Handera bzw. Palm), die auch als "PDA" (Personal Digital Assistant) bezeichnet werden, eingesetzt und mit einer speziellen Software für Zeitstudien ausgestattet. Die Gesamtarbeitszeit (GAZ) wurde in einzelne Arbeitsabschnitte gegliedert und, soweit möglich, getrennt nach Bearbeitungseinheiten (z. B. gefällte Bäume) aufgenommen. Die Ablaufabschnitte lassen sich in Reine Arbeitszeit (RAZ) und Allgemeine Zeiten (AZ) untergliedern. Die Reine Arbeitszeit setzt sich aus den Zeiten zusammen, die ausschließlich durch den betreffenden Arbeitsgegenstand verursacht werden. Die Allgemeinen Zeiten stehen dagegen mit der Bearbeitungseinheit entweder überhaupt nicht im Zusammenhang oder sie können dieser nicht zugeordnet werden, da sie unregelmäßig auftreten und nicht unmittelbar zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe dienen. Sowohl die Zeitdaten als auch die Daten des ausscheidenden Bestandes wurden im PDA gespeichert. Nach der Datenübertragung an einen stationären PC bzw. an einen Laptop wurden die Daten mit Hilfe einer Excel-Standardsoftware weiter ausgewertet. Dabei wurden Volumen, Brusthöhendurchmesser (BHD) und Mittendurchmesser in Bezug zu den Zeitdaten gesetzt, anschließend wurden Leistungsrechnungen erstellt. Das Konzept der Datenaufnahme und -auswertung ist in Abbildung 6 dargestellt.

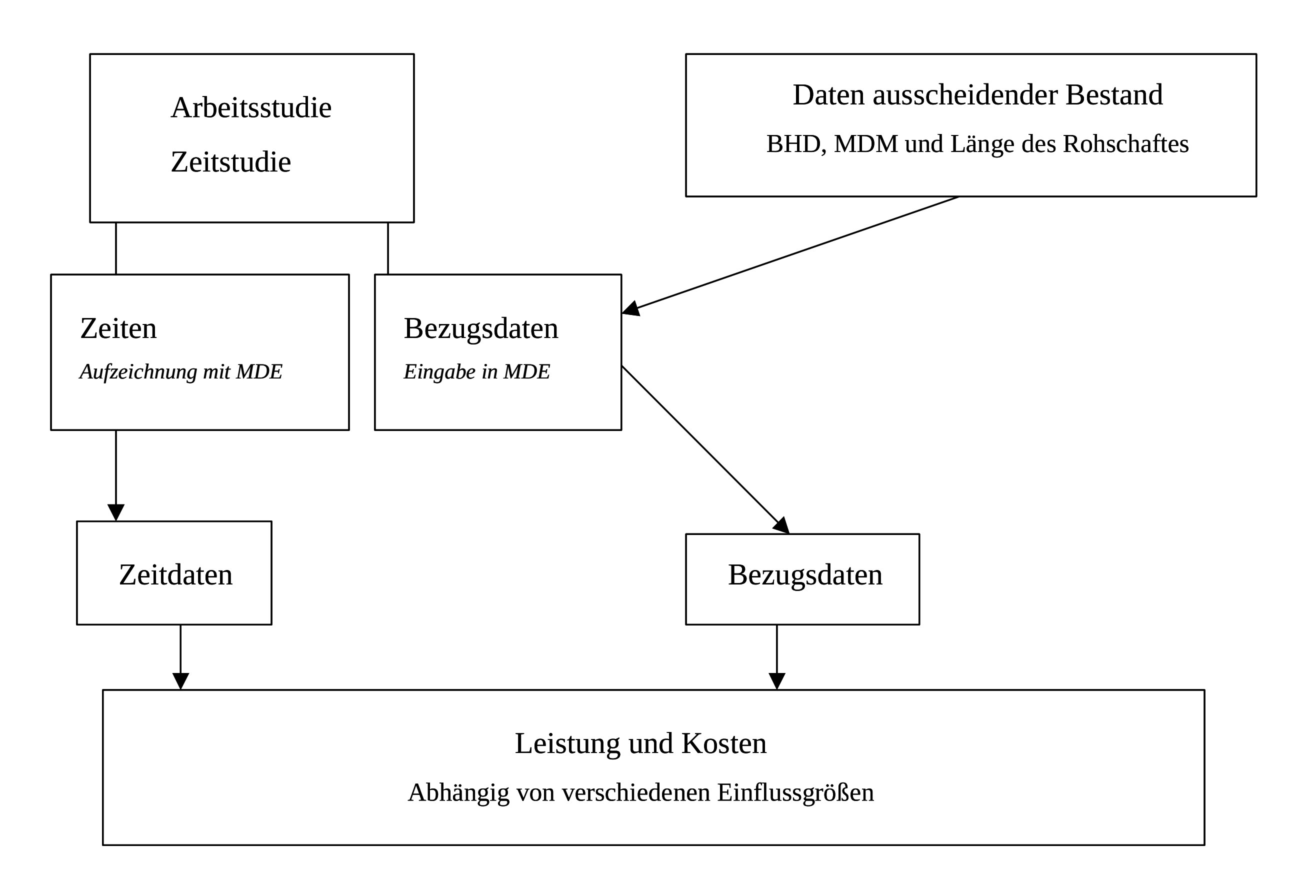


Abbildung 6: Konzept der Datenaufnahme und -auswertung in den durchgeführten Arbeitstudien (BHD Brusthöhendurchmesser, MDM Mittendurchmesser, MDE Mobile Datenerfassung)

4.1.2 Verwendete Hilfsmittel

Arbeitszeitbedarfsbestimmung mit dem PDA. Für forstliche Zeitstudien stehen heute neben speziell entwickelten mobilen Datenerfassungsgeräten auch so genannte PDA´s (Personal Digital Assistant) zur Verfügung. Der PDA, auch "Organizer" genannt, ist ein handliches Gerät, um Termine und Kontakte zu verwalten. Durch eine spezielle Zusatzsoftware lassen sich damit auch gezielt Arbeitszeitstudien durchführen. Im Vergleich zu speziellen Industrieanwendungen ist diese Variante kostengünstiger.

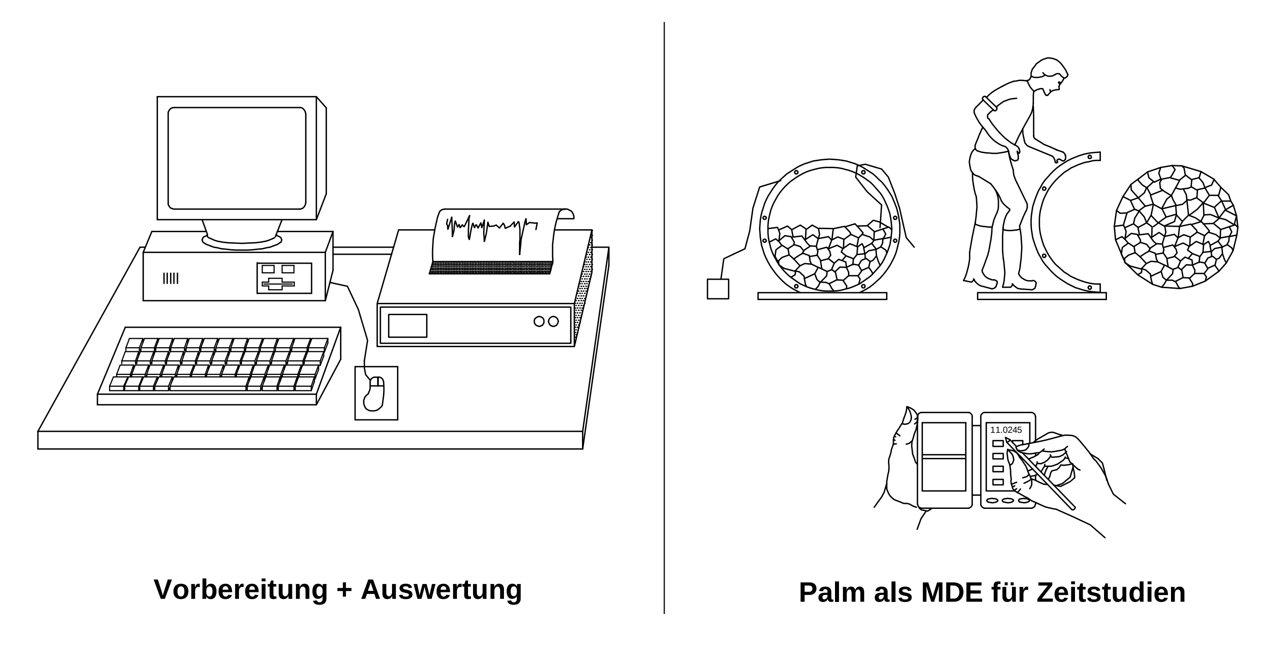


Abbildung 7: Durchführen der Arbeitszeitbestimmung mit PDA und PC
MDE Mobile Datenerfassung

Hardware. Für den reibungslosen Ablauf einer Zeitstudie stellt die Robustheit des Gerätes bei Anwendungen im Freien eines der wichtigsten Kriterien dar; es muss etwaige Stürze und Schläge verkraften können. Für einen Einsatz im Wald oder bei der Holzverarbeitung ist außerdem eine Unempfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit oder Staub erforderlich. Um diese Eigenschaften auch für einen PDA zu erreichen, wurde ein so genanntes "Aquapack", eine verschließbare Plastikhülle (oder auch eine Hardcase-Cassette aus Kunststoff) verwendet. Darin wurde der PDA wasserdicht eingepackt. Die Akkulaufzeit des PDA erlaubte ausreichend lange Betriebszeiten ohne zusätzlichen Akkuwechsel oder Ladezyklus, somit konnte die Zeiterfassung lückenlos erfolgen und problemlos eine gesamte Tagesschicht umfassen. Es wurde jeweils ein PDA der Firmen Palm und Handera verwendet, beide besaßen eine hohe Anzeigequalität, so dass die Ablesung auch bei starker Sonneneinstrahlung gut möglich war. Zusätzlich verfügten sie über eine Beleuchtungsfunktion für den Einsatz bei einsetzender Dämmerung oder Nebel.

Software. Bei forstlichen Arbeitsstudien kommen nach REFA normalerweise drei verschiedene Verfahren zum Einsatz, das Einzelzeitverfahren, das Fortschrittszeitverfahren und das Multimomentverfahren. Eine Software, die für alle drei Verfahren eingesetzt werden kann, wurde nach einer umfangreichen Marktsichtung beschafft Es handelte sich um das englischsprachige Softwarepaket UMT (Hersteller: Laubrass, Canada), welches geeignete Zeiterfassungsfunktionen besitzt, die eine Anwendung auch auf den Prozess der Brennholzgewinnung erlauben. Die Software wird unter dem Betriebssystem Palm OS betrieben. Für die Arbeitzeiterfassung werden zunächst die gewünschten Ablaufabschnitte am PC konfiguriert, indem die für die eigentliche Zeitstudie und Datenerfassung mit PDA relevanten Eingabefelder definiert werden. Zusätzlich sind jedem Eingabefeld Attribute zuzuordnen. Beispielsweise ist festzulegen, ob das Betätigen eines Feldes das Ende oder den Anfang dieses Ablaufabschnittes markiert, oder ob dieser Abschnitt zu einem bestimmten Prozentsatz verlangsamt in die Gesamtrechnung eingehen soll. Ferner ist auch eine Zuordnung zu einer vorher definierten Kategorie möglich. Die so am PC festgelegte Konfigurati-

on wird auf den PDA, mit dem die eigentliche Zeitmessung und Datenerhebung vor Ort durchgeführt wird, übertragen. Die Dauer der einzelnen Ablaufabschnitte wird von der Systemuhr des PDA gemessen und über eine entsprechende Berührung auf dem jeweiligen vordefinierten Eingabefeld des Touchscreens gestoppt (Abbildung 8). Zusätzliche Eingaben von parallel bestimmten Bezugsdaten und -mengen, wie beispielsweise der Brusthöhendurchmesser (BHD) oder zusätzlich gemessene Einzelmassen, erfolgten phasenkonform über ein entsprechendes Nummern- bzw. Textfeld. Diese Angaben wurden durch die frei definierte Einstellung bei der Datenerfassung automatisch abgefragt. Darüber hinaus bot der PDA von Handera die Möglichkeit, Beobachtungen während der Studie über die integrierte Diktierfunktion oder direkt in einem Kommentarfeld festzuhalten. Eine Zuordnung und eventuelle Korrektur ist somit problemlos möglich. Neben dem PDA benötigte der Zeitnehmer für die Datenerfassung keine weiteren Hilfsmittel während der Messung vor Ort.



Abbildung 8: Benutzung eines PDA zur Zeiterfassung in den Versuchen

4.1.3 Die Definitionen der einzelnen Arbeitsablaufabschnitte

Im folgenden werden die Arbeitsablaufabschnitte für die beiden Teilbereiche der Brennholzernte und der Scheitholzaufbereitung definiert. Zur Scheitholzaufbereitung zählt auch das Umschichten und Stapeln von Hand. Nicht messtechnisch begleitet wurden dagegen die übrigen logistischen Teilverfahrensschritte wie das Laden mit Kran, die Transporte sowie das Abladen am Aufarbeitungsplatz oder beim Kunden. Diese für die Prozesskettenanalyse benötigten Daten konnten durch Nebenrechnungen auf Basis realistischer Annahmen oder durch Verwendung anderer Datenquellen hinreichend genau abgeschätzt werden (vgl. hierzu Kapitel 1).

4.1.3.1 Untersuchungen zur Brennholzernte (Selbstwerber)

Bei der Brennholzernte ist die Vielfalt der Rahmenbedingungen, der Bestandesflächen, der Baumarten und vor allem auch der beteiligten Akteure besonders groß. Die Ernte wird von professionellen Unternehmern aber auch von privaten und kleingewerblichen Personen, den so genannten "Selbstwerbern", durchgeführt. Professionelle Unternehmer sind häufig vorrangig an der Bereitstellung von Industrieholzsortimenten oder Holzhackschnitzeln interessiert. Hierzu liegen bereits umfangreiche Arbeitszeituntersuchungen vor (vgl. u. a. [58] und [57]). Da derartige Industrieholzsortimente prinzipiell – und in jüngster Zeit zunehmend häufiger – auch zu Brennholz weiterverarbeitet werden, kann für diesen Weg der Brennstoffbereitstellung auf vorhandene Zeitdaten zurückgegriffen werden.

Bislang kaum untersucht ist dagegen die direkte Brennholzernte durch Selbstwerber. Solche Privatpersonen erhalten von einem Waldbesitzer (Privatwald, Kommunalwald oder Staatswald) eine bestimmte Fläche, das sogenannte „Flächenlos“, zugewiesen. Auf diesem Flächenlos sind die zu fällenden Bäume vom Förster bereits markiert [25]. Wegen der hierzu bestehenden Datenlücken wurden zu diesen Selbstwerbearbeiten verschiedenen Zeitstudien in verschiedenen Beständen durchgeführt, wobei diese Untersuchung sich auf die Jungdurchforstung (JD) bezog. Nicht betrachtet wurden dagegen bereits geerntete Flächen mit Ernterückständen ("Schlagabraum"). Eine Zusammenstellung aller Merkmale der in diesen Zeitstudien betrachteten Bestände und Probanden zeigt Anhang 11.1.

Die Holzernte wurde mit der Motorsäge durchgeführt, wobei das Rundholz meist schon im Bestand abgelängt wurde. Das Vorliefern erfolgte von Hand. Verschiedene Baumarten wie Fichte, Kiefer, Esche und Buche wurden während der Studien aufgenommen. Die Betrachtung endete bei der Ablage des Rundholzes an der Waldstraße.

Für die Zeitstudien zur Brennholzernte wurden zwei verschiedene akademisch vorgebildete Zeitnehmer eingesetzt, die Messungen zur Aufbereitung (Kapitel 4.1.3.2) wurden einheitlich von einem dritten Zeitnehmer durchgeführt. Die verschiedenen Tätigkeiten der Zeitnehmer wurden in einem Vorversuch getestet, dabei wurde auch eine geeignete Methode der Volumenmessung festgelegt und ein günstiger Aufenthaltsbereich für die Zeitnehmer gewählt, um eine möglichst minimale Einflussnahme bei einer geringstmöglichen Gefährdung des Zeitnehmers sicherzustellen.

Die beobachteten Brennholz-Selbstwerber arbeiteten teilweise sehr unterschiedlich hinsichtlich ihrer Ausstattung und des Ablaufes der einzelnen Tätigkeiten. Dort, wo es möglich war, wurden die anfallenden Ablaufabschnitte einem Zyklus zugeordnet. Ein Zyklus umfasst in der Regel das Fällen und Aufarbeiten eines Baumes sowie das Vorliefern bis zur nächsten befahrbaren Rückegasse. War diese Zuordnung nicht möglich, so wurde auf eine Zyklenauswertung verzichtet und nur eine einfache Leistungsrechnung erstellt, das heißt z. B., dass die gesamte gefällte Holzmenge durch die benötigte Zeit geteilt wurde, um ein Maß für eine Leistung zur erhalten. Die Möglichkeit einer Leistungsangabe in Bezug auf den Brusthöhendurchmesser entfällt dabei. Im Vorfeld wurden folgende Ablaufabschnitte und deren Trennpunkte definiert:

- *Rüsten.* Unter Rüsten versteht man zum einen die Arbeiten, die zu Beginn des Arbeitstages notwendig sind, um die eigentliche Arbeit beginnen zu können, und zum anderen die Tätigkeiten, die beim Abschluss eines Arbeitstages nötig sind. Im Einzelnen sind dies z. B. das Be-

tanken der Motorsäge und der Transport des benötigten Werkzeugs an den Bestand sowie der Abtransport der Geräte zum Fahrzeug am Arbeitsende.

- *PVZ.* Die persönlich bedingte Verteilzeit vereinheitlicht die Zeiten, in denen sich ein Arbeiter nicht der eigentlichen Arbeit widmet. Das ist z. B. ein Gespräch mit dem Kollegen, eine kurze Raucherpause, Austreten, Ablegen von Kleidungsstücken etc. Eine längere Pause (z. B. Mittagspause) wird unter PVZ nicht erfasst.

- *SVZ.* Die sachlich bedingte Verteilzeit beinhaltet Zeiten, die für die Wartung des Gerätes während der eigentlichen Arbeitszeit, also nicht während des Rüstens, anfällt. Hierunter fällt beispielsweise das Schärfen der Kette, das Nachtanken etc.

- *Sonstige Zeiten.* Dahinter verbergen sich unvorhersehbare Tätigkeiten wie z. B. Fragen, Anweisungen und Erläuterungen vom Zeitnehmer.

- *Gehen (Baum aufsuchen).* Der Ablaufabschnitt „Gehen“ bezieht sich auf den Zeitraum vom Ende des Ablängens (Ende des Sägevorgangs) bis zum Beginn des Freischneidens (Ansetzen der Säge) oder – falls nicht freigeschnitten wird – des Fällens. Darüber hinaus wurden aber auch unregelmäßig auftretende Laufwege, z. B. Heranholen eines vergessenen Werkzeugs dem „Gehen“ zugeordnet.

- *Freischneiden.* Beim Freischneiden befreit man den zu fällenden Baum von Ästen, die bei der Fällarbeit stören. Zusätzlich wird dabei der Arbeitsraum, der für die Fällarbeit benötigt wird von Gestrüpp befreit.

- *Fällen (und zu Fall bringen).* Das Fällen beginnt mit dem Ansätzen der Motorsäge zum Fällschnitt. Der daran anschließende Abschnitt beginnt, wenn der Baum gefällt am Boden liegt.

- *Asten/Ablängen.* Da diese Arbeiten oft ineinander übergehen, wurden sie hier zu einem Ablaufabschnitt zusammengefasst. Beim Entasten werden die Äste vom Baumstamm abgetrennt und anschließend in 1-m- bzw. 2-m-Rollen abgelängt. Dieser Abschnitt beginnt beim Einhängen des Rollmaßbandes am Baumstamm oder, falls kein Maßband verwendet wurde, beim Absägen des ersten Astes.

- *Vorliefern.* Beim Vorliefern werden die Meterstücke aus dem Bestand zu den Abfuhrstellen getragen. Dieser Ablaufabschnitt beginnt mit der Aufnahme des ersten Meter- bzw. Zwei-Meter-Stücks.

- *Seilarbeit.* In einzelnen Arbeitsstudien wurde beim Fällen bzw. beim Vorliefern Seilwinden eingesetzt. Die dazu gehörenden Einzeltätigkeiten (Schlepper positionieren, Seilauszug etc.) wurden unter dem Abschnitt "Seilarbeit" zusammengefasst.

Da die hier durchgeführten Zeitmessungen nicht nur der Feststellung der Verteilung der Ablaufabschnitte dienten, sondern auch eine Feststellung der Leistung bei der Holzernte ermöglichen sollte, musste zu jedem Zyklus das bearbeitete Volumen (in Festmeter mit Rinde) ermittelt werden. Je nach gewähltem Verfahren werden für die Bestimmung des Volumens eines Baumes ein oder mehrere Durchmesser sowie die Baumlänge benötigt [36]. Bei der Berechnung des Volumens nach Gleichung (1) benötigt man den Mittendurchmesser (nach HUBER [36]).

$$v = g_m * l \qquad (1)$$

wobei v das Volumen ist, g_m die Grundfläche (Querschnittsfläche) in der Mitte des Rundholzes und l die Länge des Baumes oder Rundholzes. Die SMALIAN´sche Formel [36] für die Volumenberechnung ist in Gleichung (2) angegeben.

$$v = \frac{(g_o + g_u)}{2} * l \qquad (2)$$

Dabei sind g_o und g_u die Grundflächen der jeweiligen Enden des Stammes oder Rundlinge. Je nach Messmöglichkeit wurde in der vorliegenden Untersuchung jeweils die eine oder die andere Volumenbestimmungsmethode verwendet. Die Durchmesser wurden forstlich mit der Kluppe bestimmt (Abbildung 9), d. h. es wurde auf einen Zentimeter genau abgelesen. Ab 20 cm Durchmesser oder bei besonders unförmigem Rundholz wurde eine Kreuzkluppung, d. h. eine zweifache um 90° versetzte Messung, vorgenommen.



Abbildung 9: Elektronische Kluppe für die Durchmesserbestimmung

Bei der Längenbestimmung wurde ebenfalls unterschiedlich vorgegangen. Gemessen wurde das liegende Rundholz bis zu einem Zopfdurchmesser von 7 cm. Wenn der Waldarbeiter das Holz unmittelbar nach dem Zufallbringen des Baumes ablängte, d. h. das Rundholz sofort in 1 m lange Stücke sägte, wurden die liegenden 1 m Rundlinge gezählt, um die gesamte Baumlänge festzustellen. Beim Ablängen war dabei mit einem Maßband der jeweilige Sägeschnitt festgelegt worden.

Derartige Kompromisse bei der Wahl des Messverfahrens für die Längenbestimmung waren teilweise erforderlich, um den Arbeitsablauf durch die Messung nicht zu stören und um einen Aufenthalt der messenden Person im Gefahrenbereich der umfallenden Bäume zu vermeiden.

4.1.3.2 Untersuchung zur Scheitholzaufbereitung

Die Verarbeitung von Rundholz zu Brennholz (Scheitholz) kann auf sehr unterschiedliche Art erfolgen. In der Praxis reicht die Spannweite von der manuellen Arbeit mit Bügelsäge und Axt bis hin zum Einsatz moderner kombinierter Säge-Spalt-Maschinen. Um eine möglichst hohe verfahrensübergreifende Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten wurde versucht, gemeinsame Arbeitsablaufabschnitte aller Verfahren zu identifizieren und zu messen: Hierbei handelt es sich um die Abschnitte "Holz holen", "Holz verarbeiten" und "Holz ablegen". Diese drei Arbeitsablaufabschnitte waren durchgehend zu allen Untersuchungen darstellbar. Nachfolgend werden die darüber hinausgehenden Ablaufabschnitte für die einzelnen Aufbereitungsverfahren separat erläutert.

Spalten mit der Axt oder Spalthammer (33-cm-Rundlinge). Neben der Holzernte werden bei der Scheitholzproduktion auch heute noch vielfach eine Axt oder ein Spalthammer eingesetzt. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten. Zum einen ist es die Zerkleinerung bereits gespaltener Scheite und zum anderen das Spalten von Rundholzrollen (eigentliches Scheitholzspalten). Bei beiden Tätigkeiten wird das zu bearbeitende Holz von einem Haufen in der Nähe des Hackstocks (ca. 2 m Entfernung) geholt, dann auf dem Hackstock auf die gewünschte Größe gespalten und anschließend in ein Lager (ca. 2 m Entfernung vom Hackstock) geworfen. Um die Spalt-Arbeitszeit beim noch ungespaltenen Holz genau der Produktmenge zuordnen zu können, wurde der Durchmesser des zu spaltenden Rundlings vom Probanden, d. h. vom Hackenden selbst, mit einer Kluppe gemessen. Dieser Zeitabschnitt wurde dann bei der Auswertung für die Leistungsermittlung nicht berücksichtigt. Es wurden Rundlinge mit einer Länge von 33 cm gespalten, wobei die Arbeitszeit für das Sägen separat erfasst wurde (siehe unten). Aus der Länge und dem Durchmesser der 33 cm-Rundholzrollen wurde das Volumen gemäß Gleichung (1) (Kapitel 4.1.3.1) errechnet. Die einzelnen Arbeitsablaufabschnitte beim Spalten mit der Axt oder dem Spalthammer sind nachfolgend zusammengestellt.

- *Rüsten.* Beim Spalten mit der Axt oder mit dem Spalthammer umfasst das Rüsten den Transport der Axt zum Hackstock, das Vorbereiten des Arbeitsplatzes und das Platzieren der Lagerbehälter.
- *PVZ.* Identisch zu Definition in Kapitel 4.1.3.1.
- *SVZ.* Die sachlich bedingte Verteilzeit (vgl. Kapitel 4.1.3.1), die auch als "maschinelle Verteilzeit" bezeichnet wird, war hier wegen der reinen Handarbeit nicht aufzunehmen.
- *Holz holen.* Das Holz vom Lagerhaufen holen. Dieser Abschnitt beginnt mit dem Gang zum Haufen und endet mit der Ablage des Scheites auf dem Hackklotz.
- *Durchmesser ermitteln.* Für Messungen mit dem Spalthammer bzw. der Axt war es durchweg erforderlich, dass der Arbeiter den Durchmesser des Rundholzes für die Volumenbestimmung ermittelte. Dieser Arbeitsablaufabschnitt wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Er

beginnt mit dem Griff zur Kluppe (Messgerät). Bei Messungen an bereits gespaltenen Scheiten (weitere Zerkleinerung) war eine solche Volumenbestimmung wegen der unregelmäßigen Form nicht möglich. Hier wurde das Holzvolumen nicht für jeden Zyklus individuell, sondern für die gesamte Dauer der Zeitstudie durch Schütt-Volumenbestimmung in den Gitterboxen festgestellt.

- *Holz spalten.* Das Spalten des Holzes mit der Axt bzw. dem Spalthammer. Dieser Arbeitsablaufabschnitt beginnt mit dem Griff zur Axt/Spalthammer.
- *Holz ablegen.* Das Ablegen des Holzes beginnt mit dem Griff zu den Scheiten und beinhaltet den Wurf auf den Lagerhaufen oder in die Gitterbox.

Außerdem wurden *Unterbrechungen*, die auftraten wenn z. B. die zeitnehmende Person Fragen an den Probanden hatte, und *sonstige Zeiten* für Unvorhersehbares, das nicht auszuwerten war, festgehalten. Die Mittagspause wurde nicht separat erfasst bzw. als "*Pause*" gekennzeichnet und in den Auswertungen nicht berücksichtigt.

Holzspalten mit dem kleinen Senkrechtspalter (33-cm-Rundlinge). Der Ablauf des Senkrecht-Spaltens ist dem Spalten mit der Axt sehr ähnlich. Als wesentlicher Unterschied ist zu nennen, dass der Arbeitsablaufabschnitt *Holz zurechtrücken* hier interessehalber separat erfasst wurde. Er muss nicht immer zwingend auftreten, wird aber zu der momentanen Zykluszeit hinzuaddiert. Dies hat den Vorteil, dass der Arbeitsablaufabschnitt „Holz spalten“ in zwei Arbeitsablaufabschnitte, nämlich „Holz spalten“ und „Holz zurechtrücken“ dargestellt und besser ausgewertet werden kann. Für die hier durchgeführte Untersuchung kam ein Spalter des Typs 6 SD der Firma Elektra Beckum zum Einsatz (zu den technischen Daten siehe Anhang 11.1). Eine Durchmesserverteilung der verwendeten Rundlinge ist in Kapitel 5.2.2 dargestellt. Die einzelnen Arbeitsablaufabschnitte beim Spalten mit dem kleinen Senkrechtspalter sind nachfolgend zusammengestellt.

- *Rüsten.* Das Rüsten umfasst den Aufbau des Arbeitsplatzes bis zum Beginn des Spaltens.
- *Holz holen.* Das Holz vom Lagerhaufen holen. Dieser Abschnitt beginnt mit dem Gang zum Haufen.
- *Durchmesser ermitteln.* Für Messungen mit dem kleinen Senkrechtspalter war es erforderlich, dass der Arbeiter den Durchmesser des Rundholzes für die Volumenbestimmung ermittelte. Dieser Arbeitsablaufabschnitt wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Er beginnt mit dem Griff zur Kluppe (Messgerät).
- *Holz zurechtrücken.* Damit der Spaltkeil an der richtigen Stelle spaltet, ist es notwendig, das Holzstück an der geeigneten Stelle unter dem Spaltkeil zu platzieren.
- *Holz spalten.* Dieser Arbeitsablaufabschnitt beginnt mit dem Senken des Spaltkeils.
- *Holz ablegen.* Das Ablegen des Holzes beginnt mit dem Griff zu den gespaltenen Scheiten und beinhaltet den Wurf auf den Lagerhaufen oder in die Gitterbox.

Hinzu kommt die Erfassung der persönlichen (*PVZ*) und sachlichen Verteilzeiten (*SVZ*), die in Kapitel 4.1.3.1 definiert werden. Außerdem wurden *Unterbrechungen* und *sonstige Zeiten* sowie gegebenenfalls die Mittagspause als "*Pause*" festgehalten.

Spalten mit dem großen Senkrechtspalter (1-m-Rundlinge). Bei der Arbeitszeitstudie mit dem großen Senkrechtspalter wurde das Volumen der einzelnen Rundhölzer schon vor Beginn der Arbeit ermittelt. Die Hölzer wurden mit einer Nummer versehen, die vom Zeitnehmer beim Arbeitsablaufabschnitt "Spalten" aufgezeichnet wurde. Eine Durchmesserverteilung der verwendeten Rundlinge ist in Kapitel 5.2.3 dargestellt.

Das noch ungespaltene Meterholz wird beim Senkrechtspalter mit Muskelkraft auf die Bodenplatte an der Spaltvorrichtung gestemmt. Beide Hände müssen nun den Hebel zum Herunterfahren des Spaltkeils bedienen. Das gespaltene Holz fällt zu Boden und wird gegebenenfalls ein weiteres Mal gespalten. Danach wird es vom Boden aufgelesen und auf einen Stapel gelegt. In den durchgeführten Versuchen wurden zwei Geräte, der Edora Senkrechtspalter und der Spaltbrummi der Firma Vogesenblitz mit jeweils 16 t bzw. 25 t Spaltdruck, auf landwirtschaftlichen Betrieben untersucht (zu den technischen Daten siehe Anhang 11.1). Teilweise lieferte ein Arbeiter die zu spaltenden Rundhölzer an und bewerkstelligte auch das Aufschichten der verarbeiteten Holzscheite während ein zweiter Arbeiter nur spaltete. Aufgenommen wurde in diesem Fall ausschließlich die Tätigkeit des Arbeiters an dem Spaltgerät. Bei den Berechnungen zur Produktivität des Verfahrens wurde jedoch die zweite Arbeitskraft mit berücksichtigt. Die einzelnen Arbeitsablaufabschnitte beim Spalten mit dem großen Senkrechtspalter werden nachfolgend beschrieben.

- *Rüsten.* Das Rüsten umfasst den Aufbau des Arbeitsplatzes bis zum Beginn des ersten Spaltens.
- *Holz holen.* Das Holz vom Lagerhaufen holen. Dieser Abschnitt beginnt mit dem Gang vom Spalter zum Haufen oder Stapel. Wenn ein zweiter Arbeiter das Holz schon geholt hat, beinhaltet Holz holen nur das Greifen nach dem Holz. Der Vorgang endet mit dem Ablegen des Holzes unter dem Spaltkeil. Für den Zeitnehmer öffnete sich während dieses Vorgangs auf dem Eingabedisplay seines PDA ein Nummerfeld, in dem er die laufende Rundholznummer vermerkte.
- *Holz zurechtrücken.* Damit der Spaltkeil an der richtigen Stelle spaltet, ist es notwendig, das Holz an die geeignete Stelle unter dem Spaltkeil zurechtzurücken (wird zur Zykluszeit hinzuaddiert, muss aber nicht bei jedem Zyklus auftreten).
- *Holz spalten.* Das Spalten des Holzes mit dem Spalter. Dieser Arbeitsablaufabschnitt beginnt mit dem Herabfahren des Spaltkeils.
- *Holz ablegen*. Das Ablegen des Holzes beginnt mit dem Griff zu den Scheiten und beinhaltet den Wurf auf den Lagerhaufen oder das Ablegen des 1 m-Scheites auf einen Stapel.
- *Spalter versetzen*. Der Schlepper, an dem der Spalter angebracht ist, wird um ein paar Meter versetzt, um wieder einen optimalen Abstand zum Rundholzvorrat oder zur Ablage herzustellen.

Hinzu kommt die Erfassung der persönlichen (*PVZ*) und sachlichen Verteilzeiten (*SVZ*), die in Kapitel 4.1.3.1 definiert werden. Außerdem wurden *Unterbrechungen* und *sonstige Zeiten* sowie ggf. die Mittagspause als "*Pause*" festgehalten.

Holzspalten mit dem Waagerechtspalter (1-m-Rundlinge). Bei der Arbeitszeitstudie mit dem großen Waagerechtspalter wurde das Volumen der einzelnen Rundhölzer ebenfalls schon vor Be-

ginn der Spaltarbeiten ermittelt. Die Hölzer wurden nummeriert, um vom Zeitnehmer zyklusnah aufgezeichnet werden zu können. Eine Durchmesserverteilung der verwendeten Rundlinge ist in Kapitel 5.2.4 dargestellt.

Das Rundholz wird beim Waagerechtspalter mit Muskelkraft auf die Hubschwinge gelegt und hydraulisch nach oben in eine Wanne vor den Stempel geführt. Der Stempel drückt nun den waagerecht liegenden Rundling durch das Spaltkreuz. Die fertigen Scheite müssen mit der Hand von der Ablage zum Stapel transportiert werden. Meist arbeiten zwei Personen an einem Gerät; ein Maschinist und ein Zubringer. In der Untersuchung wurden Arbeiten an zwei verschiedenen Waagerechtspaltern durchgeführt. Dabei kamen der Splitmaster der Firma Posch und ein SP 30 HZH/S der Firma BGU zum Einsatz (zu den technischen Daten siehe Anhang 11.1). Beide Untersuchungen fanden in landwirtschaftlichen Betrieben statt. Die einzelnen Arbeitsablaufabschnitte sind nachfolgend zusammengestellt:

- *Rüsten.* Das Rüsten umfasst den Aufbau des Arbeitsplatzes bis zum Beginn des ersten Spaltens.
- *Beladen*. Das Holz vom Lagerhaufen holen. Dieser Abschnitt beginnt mit dem Gang zum Haufen oder Stapel.
- *Holz zurechtrücken*. Das Holz in der Wanne zurechtrücken, damit es optimal vom Stempel zugeführt werden kann (wird zur Zykluszeit hinzuaddiert, muss aber nicht bei jedem Zyklus auftreten).
- *Stempelvorschub*. Das Spalten des Holzes mit dem Spalter. Dieser Arbeitsablaufabschnitt beginnt mit dem Vorschub des Stempels. Für den Zeitnehmer öffnete sich auf dem Eingabedisplay seines PDA ein Nummerfeld, in dem er die laufende Rundholznummer vermerkte.
- *Kreuz korrigieren*. Das Spaltkreuz wird in der Höhe variiert, um die Kreuzmitte der Rundholzmitte anzugleichen.
- *Spalter versetzen*. Der Schlepper, an dem der Spalter angebracht ist, wird um ein paar Meter versetzt, um wieder einen optimalen Abstand zum Lager oder der Ablage herzustellen.

Hinzu kommt die Erfassung der persönlichen (*PVZ*) und sachlichen Verteilzeiten (*SVZ*), die in Kapitel 4.1.3.1 definiert werden. Außerdem wurden *Unterbrechungen* und *sonstige Zeiten* sowie ggf. die Mittagspause als "*Pause*" festgehalten.

Kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine. Bei diesen Maschinen wird Rundholz bis zu einem maximalen Durchmesser von 35 cm und bis zu einer maximalen Länge von vier Metern dem Sägeblatt oder Sägeschwert von Hand zugeführt. Nach dem Ablängen wird das Holz automatisch von einem Stempel durch ein Spaltkreuz gedrückt. Die so entstandenen Scheite werden von einem Förderband in einen Lagerbehälter (z. B. eine Gitterbox) transportiert. Die Untersuchungen fanden auf einem landwirtschaftlichen Betrieb und auf dem Gelände eines großen Brennholzhandels (Biomassehof Kempten) statt. Die Durchmesserverteilung des in den Versuchen verwendeten Holzes ist in Kapitel 5.2.5 dargestellt.

Es wurden zwei verschiedene Maschinen eingesetzt, ein Hakki Pilke EASY 2X und ein Posch Spaltfix 300, wobei an beiden Maschinen Holzlängen von 2 bis 4 m und etwa gleichen Durchmessern verarbeitet wurden. Die Hakki Pilke Maschine wird stationär mit elektrischem Strom

betrieben. Sie besitzt an ihrem Zuführ-Förderband einen laderampenähnlichen Aufbau, der es ermöglicht einen Vorrat an Rundholz zu lagern. Damit ist es nicht erforderlich, dass das Holz manuell auf das Band gehoben werden muss. Lediglich die Beförderung des Rundholzes auf das Förderband erfolgt manuell durch Rollen. Das Förderband wird maschinell betrieben und dient dem Vorschub des Rundholzes. Das Ablängen geschieht dann mit einer installierten Kettensäge. Das abgesägte Holz fällt nach unten in eine von zwei Wannen, wobei automatisch einer von zwei Stempeln das Holz durch das verstellbare Spaltkreuz drückt. Das nun gespaltene Scheitholz fällt auf ein Förderband, welches das Holz in eine Gitterbox transportiert. In den Versuchen wurde mit beiden Maschinen ausschließlich Buchenholz aufbereitet.

Beim Posch Spaltfix 300 handelt es sich um eine versetzbare Maschine, die an der Dreipunktaufhängung eines Traktors befestigt und von der Traktorzapfwelle angetrieben wird. Die Zeitstudie wurde direkt an einem Lagerplatz im Wald bei Temperaturen von -10° C durchgeführt. Anstatt wie bei den anderen Studien zur kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine das Rundholz mit Hilfe einer Laderampe auf das Förderband zu rollen, wurde es von einem weiteren Arbeiter auf das Band gehoben. Zum Ablängen ist das Gerät mit einer Kreissäge ausgestattet. Der abgesägte Rundholzzylinder fällt in eine Wanne, worauf er von einem Hydraulikstempel durch ein verstellbares Spaltkreuz gedrückt wird. Ein Förderband transportiert es dann auf einen Anhänger. Die einzelnen Arbeitsablaufabschnitte bei den kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschinen sind nachfolgend zusammengestellt. Der Arbeitsablaufabschnitt „Holz bearbeiten“ wurde zur genaueren Untersuchung in „Vorschub“ und „Sägen“ unterteilt. Sie treten in einem Zyklus mehrmals auf.

- *Rüsten.* Das Rüsten umfasst den Aufbau des Arbeitsplatzes bis zum Beginn des ersten Spaltens.
- *Beladen.* Hierunter ist das Beladen der Zuführvorrichtung der kombinierten Säge-Spaltmaschine mit Rundholz zu verstehen.
- *Gitterbox wechseln*. Ein voller Lagerbehälter wird gegen einen leeren ausgetauscht (Gitterbox oder Anhänger).
- *Fördern*. Zu diesem Zeitpunkt wurde das Rundholz manuell auf das Förderband gerollt und bis zum Anschlag an der Säge vorgefahren. Für den Zeitnehmer öffnete sich auf dem Eingabedisplay seines PDA ein Nummerfeld, in dem er die laufende Rundholznummer vermerkte.
- *Vorschub*. Sobald das Rundholz an den Anschlag gefahren ist beginnt der Vorschub. Er beträgt hier 33 cm und endet mit dem Beginn des Sägens.
- *Sägen*. Das Sägen beginnt mit der Bewegung des Sägeschwertes (oder dem Sägeblatt) und endet, wenn das Sägeschwert wieder in Ruheposition ist.

Hinzu kommt die Erfassung der persönlichen (*PVZ*) und sachlichen Verteilzeiten (*SVZ*), die in Kapitel 4.1.3.1 definiert werden. Außerdem wurden *Unterbrechungen* und ggf. die Mittagspause als "*Pause*" sowie *sonstige Zeiten* festgehalten, womit z. B. das Hantieren am Stempel zum Lösen von Verkeilungen gemeint ist.

Große kombinierte Säge-Spaltmaschine. Ein großer Spaltautomat zersägt Rundholz mit bis zu 8 m Länge auf die gewünschte spätere Scheitholzlänge und spaltet die kurzen Rundlinge in einem nachfolgendem Arbeitsgang automatisch zu Scheiten. Das fertige Scheitholz wird anschließend mit einem Förderband in eine Gitterbox oder in das Holzlager befördert. Die große Säge-Spaltmaschine wird maschinell bestückt. Der Arbeiter befindet sich am Bedienpult. Die körperliche Anstrengung ist auf ein Minimum reduziert und beschränkt sich auf das Beheben von Störungen oder auf maschinelle (sachliche) Verteilzeiten (SVZ) wie das Wechseln der Kette oder Ähnlichem. Im Zuge der Erhebung wurden zwei große Spaltautomaten untersucht. Zum einem der Herkules II der Firma Kretzer und zum anderen eine Maschine der Firma S&Ü (zu den technischen Daten siehe Anhang 11.1). Alle Untersuchungen fanden auf dem Gelände von großen Brennholzhändlern statt. Die Arbeitsablaufabschnitte beim Spalten mit der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine stimmen mit der oben genannten kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine überein. Sie werden daher nachfolgend nicht mehr separat zusammengestellt. Die Durchmesserverteilung des in den Versuchen verwendeten Holzes ist in Kapitel 5.2.6 dargestellt.

Holz sägen mit der Brennholzkreissäge. Es gibt unterschiedliche Typen von Kreissägen. Für die Brennholzbearbeitung ist die Wippkreissäge besonders sinnvoll. Dabei wird das Brennholz in eine Wanne gelegt, die zum Sägeblatt hin und zurück gekippt wird. Mit der Brennholzkreissäge werden gespaltene Holzstücke auf die gewünschte Länge gesägt. In der Untersuchung wurden zwei Wipp-Kreissägen unterschiedlichen Fabrikats untersucht, wobei die Bedienperson jeweils alleine an der Maschine arbeitete. Die erste Kreissäge war eine WK 775 der Firma BGU. Die Zeitmessungen erfolgte auf einem landwirtschaftlichen Betrieb. Als zweite Kreissäge wurde eine BW 750 der Firma Elektra Beckum auf dem Betriebshof der TFZ-Dienststelle in Freising eingesetzt. Beide Sägen fanden bei zwei verschiedenen Abläufen Anwendung. Zum einen wurden bereits gespaltene Meterscheite gekürzt (hier: auf 33 cm Länge), und zum anderen wurde Rundholz bis zu einem Durchmesser von 30 cm gekürzt, um es anschließend erst zu spalten (Spalten mit Axt, kleiner Senkrechtspalter). Die einzelnen Arbeitsablaufabschnitte beim Sägen mit Brennholzsäge sind nachfolgend zusammengestellt.

- *Rüsten*. Das Rüsten umfasst den Aufbau des Arbeitsplatzes bis zum Beginn des ersten Sägens.
- *Holz holen*. Das Holz wird vom Lagerhaufen geholt. Der Arbeitsabschnitt beginnt mit dem Ende des Scheitablegens und endet mit dem Beginn des Sägens (Vorkippen mit der Wippe).
- *Holz sägen*. Der Abschnitt Sägen beginnt mit dem Vorkippen mit der Wippe und endet wenn das gesamte Scheit zersägt ist (das heißt ggf. auch mehrere Schnitte).
- *Holz ablegen*. Das Ablegen des Holzes beginnt, wenn die Wippe nach dem letzten Sägen in die Ausgangslage zurückgefallen ist und umfasst auch das Werfen des Holzes in den jeweiligen Behälter.
- *Gitterbox wechseln*. Dieser Abschnitt umfasst das Austauschen eines vollen gegen einen leeren Container oder Anhänger.

Hinzu kommt die Erfassung der persönlichen (*PVZ*) und sachlichen Verteilzeiten (*SVZ*), die in Kapitel 4.1.3.1 definiert werden. Außerdem wurden *Unterbrechungen* und *sonstige Zeiten* sowie ggf. die Mittagspause als "*Pause*" festgehalten.

Holz bündeln mit einer Bündelhilfe. Das Bündeln der Scheite zu verkaufsfertigen Einheiten (0,5 oder 1 Rm) erfolgte mit einer runden Bündelhilfe (vgl. Kapitel 4.5.2). Damit werden die Scheite mit einem Meter Länge zu kreisrunden Bündeln zusammengeschnürt. Der Rahmen besteht aus einem kleinen Podest, an dem vier Bügel montiert werden, so dass sich ein rundes Gestänge ergibt, das die Scheite zu einem Raummeterbündel zusammenhält. Mit einem Gurt und einer Ratsche wird das Bündel eng zusammengezurrt. Erst dann werden mit einem stabilen Kunstfaser-Garn zwei Wicklungen angelegt. Die Ratsche wird nun geöffnet, dann werden zwei Bügelhälften entfernt, damit das Holzbündel nun seitlich aus dem Podest gerollt werden kann. Nun wird die Bündelhilfe an einem anderen Ort wieder aufgestellt, und es kann das nächste Bündel hergestellt werden . Die Arbeitsablaufabschnitte sind nachfolgend zusammengestellt.

- *Rüsten.* Das Rüsten umfasst den Aufbau des Arbeitsplatzes und das Zusammenbauen der Bündelhilfe bis zum Beginn des ersten Schichtens.
- *Stapeln*. Hierbei werden die Scheite in den Bündelrahmen gelegt. Der Abschnitt beginnt mit der Fertigstellung des Rahmens (nach dem Rüsten oder dem Versetzen).
- *Zurren*. Mit der Ratsche wird das Rundbündel zusammengezurrt.
- *Schnüren*. Mit speziellem Garn wird das Bündel links und rechts verschnürt. Der Abschnitt endet mit dem Öffnen der Rätsche.
- *Kippen*. Das geschnürte Bündel wird aus der Bündelhilfe gekippt. Der Abschnitt beginnt mit dem Öffnen der Rätsche und endet, wenn das Bündel vom Podest entfernt wurde.
- *Versetzen*. Hier findet der Ortswechsel statt. Der Abschnitt endet, wenn der Rahmen zusammengesetzt und das Zurrband eingelegt ist (vor Beginn des Stapelns mit dem ersten Scheit).

Hinzu kommt die Erfassung der persönlichen (*PVZ*) und sachlichen Verteilzeiten (*SVZ*), die in Kapitel 4.1.3.1 definiert werden. Außerdem wurden *Unterbrechungen* und *sonstige Zeiten* sowie ggf. die Mittagspause als "*Pause*" festgehalten.

Holz schichten. Im Zuge der Versuche zur Bestimmung der Raummaße unterschiedlicher Sortimente (vgl. Kapitel 4.4) fielen umfangreiche Umschlags- und Stapelarbeiten an. Während dieser Arbeiten wurden Zeitmessungen zu diesen Arbeitsabläufen durchgeführt. Im Gegensatz zu den vorangehenden Arbeiten wurde hier mit der Stoppuhr gearbeitet. Ein Untergliedern in einzelne Arbeitsablaufabschnitte war nicht sinnvoll. Es wurden die Zeiten bis zum Auffüllen des Scheitholz-Messrahmens gemessen. Dadurch konnten die Arbeitszeiten in Bezug zur Menge gesetzt und die Produktivität errechnet werden.

4.2 Bestimmung der Arbeitsschwere

Zur Untersuchung der Arbeitsschwere bei der Scheitholzaufbereitung wurde sowohl eine empirische Untersuchung (Befragung), in der die subjektive Einschätzung interessierter Personen festgehalten wurde, als auch eine Messkampagne durchgeführt, in der anhand von Videoaufzeichnungen realer Verfahrensabläufe Messdaten generiert und ausgewertet wurden. Nachfolgend werden die beiden methodischen Ansätze vorgestellt.

4.2.1 Befragung von Experten und Laien

Um einen Anhaltswert und einen Vergleichswert zu der Methode der Arbeitsschwerebestimmung nach OWAS (vgl. Kapitel 4.2.2) zu erhalten, wurde mit Hilfe eines Fragebogens eine mündliche Umfrage zu den verschiedenen Arbeitsabläufen zur Scheitholzproduktion durchgeführt. Verschiedene Methoden der Scheitholzbereitstellung (vgl. Kapitel 2) sollten nach der Höhe der Belastung gemäß dem jeweiligen subjektivem Empfinden des Befragten in fünf Stufen (sehr leicht, leicht, mittel, schwer, sehr schwer) eingestuft werden. Als Illustration wurden dem Befragten zusammen mit dem Fragebogen Fotos zum jeweiligen Arbeitsablauf vorgelegt. Die Befragten wurden willkürlich aus dem Umfeld des Bearbeiters ausgewählt (Studenten, Arbeitskollegen, Landwirte, Familienangehörige) wobei allerdings unterschieden wurde, ob sie in den untersuchten Bereichen Erfahrung hatten oder nicht. Es wurden insgesamt 60 Befragungen durchgeführt, bei denen es sich zur Hälfte um Personen handelte, die bereits mit den Arbeitsabläufen vertraut waren. Bei der anderen Hälfte handelte es sich um vollständige Laien. Der verwendete Fragebogen ist in Anhang 11.2 dargestellt.

4.2.2 Methode der Bestimmung der Arbeitsschwere nach OWAS

Die Bestimmungsmethode für die Arbeitsschwere nach OWAS (Ovako Working Posture Analysing System) wurde vom finnischen Stahlwerk Ovako im Jahr 1974 entwickelt. Ziel war es, ein Schema zu entwickeln, welches alle denkbaren Arbeitshaltungen aufnimmt [51]. Später wurde das System auf andere Wirtschaftszweige wie Bergbau, Holz- oder Textilindustrie übertragen. So entstand ein standardisiertes Verfahren zur Analyse und Bewertung von Körperhaltungen bei der Arbeit.

Die OWAS-Methode kann in die Basis-OWAS-Methode und in die punktuelle OWAS-Methode unterteilt werden [50]. Mit der punktuellen Methode wird ausschließlich die Arbeit mit den Armen, z. B. bei einer sitzenden Tätigkeit, untersucht. Die Basis-OWAS-Untersuchung, welche in der vorliegenden Untersuchung angewandt wurde, kommt dagegen bei Arbeiten zur Anwendung, bei denen der Einsatz des ganzen Körpers erforderlich ist. Sie gibt Aufschluss über die

- angewendeten Arbeitshaltungstypen,
- den relativen Anteil der einzelnen Arbeitshaltungstypen,
- den Arbeitsablaufabschnitt, dem die Arbeitshaltungstypen zuzuordnen sind,
- Maßnahmen, die bei den einzelnen Arbeitshaltungstypen ergriffen werden müssen,
- die Verteilung der Arbeitshaltungen nach Körperteilen und

- die Belastungshöhe durch Gewicht oder Kraftbedarf.

Mit der Methode nach OWAS werden die Körperhaltungen nach 14 Grundstellungen in drei Gruppen unterschieden (Abbildung 10): vier Rückenhaltungen, drei Armhaltungen und sieben Beinhaltungen. Jede Haltung in einer Gruppe lässt sich durch eine Kennziffer ausdrücken, so dass sich die Körperhaltung insgesamt durch einen dreiziffrigen Bewertungscode beschreiben lässt. Aus den 14 Grundstellungen lassen sich somit durch unterschiedliche Kombinationen 84 verschiedene Körperhaltungen mit unterschiedlichen Zifferncodes charakterisieren, d. h. die erste Ziffer beschreibt die Haltung des Rückens, bei der zweiten Ziffer handelt es sich um die Armstellung und die dritte gibt Auskunft über die Beinstellung. Ist das Gewicht des Gegenstandes, welchen der Proband trägt, bekannt, so wird zu dem 3-stelligen "Rücken-Arm-Bein"-Code noch eine vierte Ziffer hinzugefügt, es ist die "1" bei einem Gewicht bis 10 kg, die "2" für Gewichte zwischen 10 und 20 kg und die "3", wenn das Gewicht über 20 kg schwer ist. Die erweiterte OWAS-Methode, bei der zusätzlich noch die Stellung von Nacken und Kopf aufgenommen werden kann, wurde bei dieser Untersuchung nicht berücksichtigt, damit die Vergleichbarkeit mit anderen Forschungsarbeiten zu diesem Thema bestehen bleibt, zumal die Aufnahme der Kopfstellung eher selten ist.

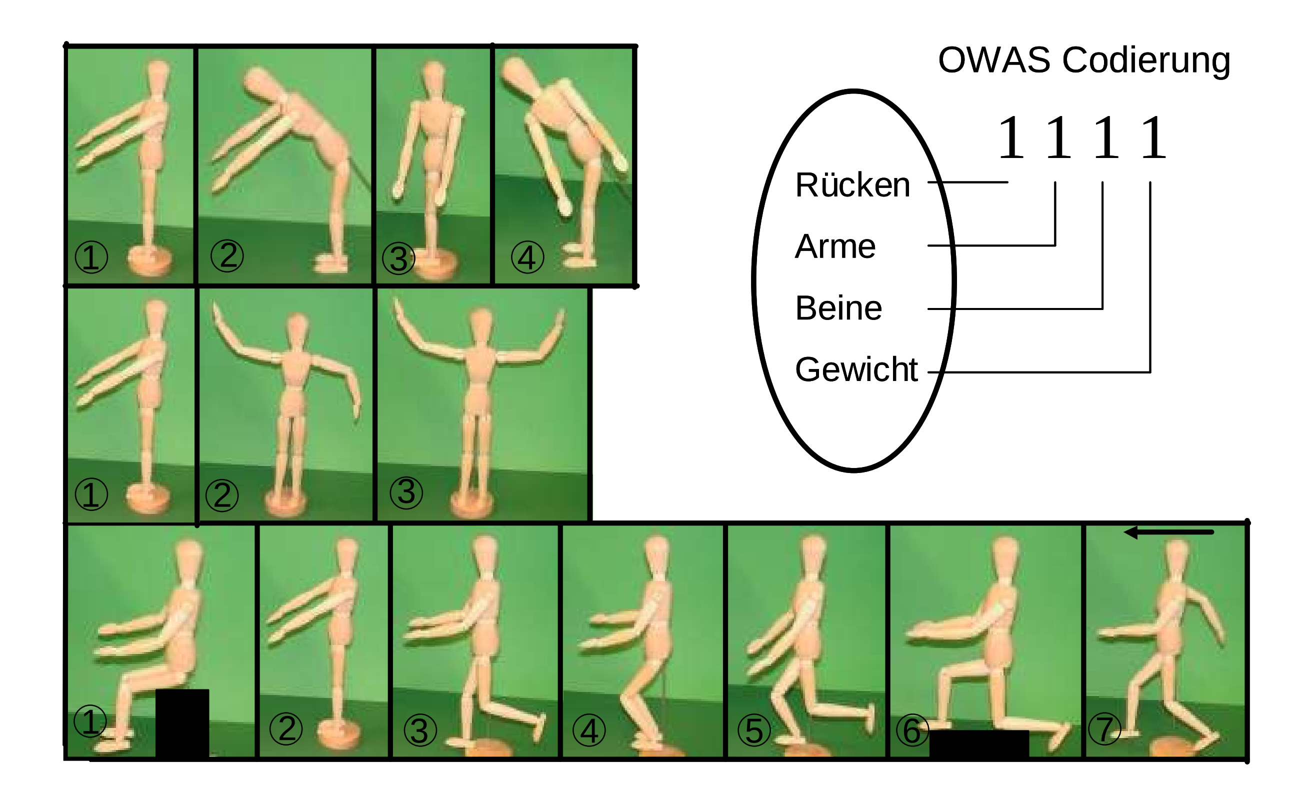


Abbildung 10: Grundstellungen mit den dazugehörenden Ziffern für den Bewertungscode der Arbeitsschwereuntersuchung nach OWAS (Quelle: eigene Darstellungen)

Mit der zusätzlichen Einteilung in die drei Gewichtsklassen besteht nun der Code aus vier Ziffern für insgesamt 252 verschiedene Kombinationsmöglichkeiten. Jede untersuchte Körperhaltung mit

ihrem vierstelligen Ziffercode wird nun einer so genannten "Maßnahmenklasse" zugeordnet. Folgende Maßnahmeklassen werden hierfür unterschieden [38]:

Maßnahmenklasse 1: Die Körperhaltung ist normal; Maßnahmen zur Arbeitsgestaltung sind nicht notwendig.

Maßnahmenklasse 2: Die Körperhaltung ist belastend; Maßnahmen, die zu einer besseren Arbeitshaltung führen, sind in nächster Zeit vorzunehmen.

Maßnahmenklasse 3: Die Körperhaltung ist deutlich belastend; Maßnahmen, die zu einer besseren Arbeitshaltung führen, müssen so schnell wie möglich vorgenommen werden.

Maßnahmenklasse 4: Die Körperhaltung ist deutlich schwer belastend; Maßnahmen, die zu einer besseren Arbeitshaltung führen, müssen unmittelbar getroffen werden.



Beispiel 1: *Code 1111*



Beispiel 2: *Code 2151*

Abbildung 11: Beispiele für die Ziffernvergabe nach Körperhaltungen bei OWAS

Beispielsweise würde eine Körperhaltung, die mit dem Code 111 beschrieben ist (Abbildung 11) und bei der eine Holzmasse von bis zu 10 kg hantiert wird und dadurch mit einer vierten Ziffer zum Code 1111 wird, nach der OWAS-Klassifizierung als Maßnahmenklasse 1 eingestuft werden. Im zweiten Beispiel in Abbildung 11 wird aufgrund der Körperhaltung der arbeitenden Person der Ziffercode 2151 vergeben, entsprechend fällt diese Situation unter die Maßnahmeklasse 3. Eine tabellarische Grundlage für diese Einteilung wurde von Fachkräften für Arbeitszeitstudien, Physiologen und Medizinern in der finnischen Schwer- und Leichtindustrie auf Basis von Belastungskalkulationen erstellt [47].

Bei der OWAS-Methode werden die Arbeitshaltungen einer oder mehrerer Menschen nach dem Multimomentverfahren ermittelt [51]. Üblicherweise befindet sich der Aufnehmer bei dieser Methode unmittelbar neben dem Probanden und notiert die Arbeitshaltung des Probanden in bestimmten vorgegebenen Intervallen (meist 30 Sekunden). Von dieser Vorgehensweise wurde hier abgewichen, indem die Arbeitsabläufe in der vorliegenden Untersuchung mit Hilfe einer Digitalkamera aufgenommen und später ohne Zeitdruck oder subjektive Momentauswahl am Computer

ausgewertet wurden. Im Abstand von exakt 30 Sekunden wurde hierzu jeweils ein Bild aus dem Videomaterial herausgefiltert; anschließend wurde dazu der OWAS-Code für die darauf abgebildete Körperhaltung mit Hilfe des Programms "WinOwas" [52] erstellt und über den ebenfalls hinterlegten Umwandlungsschlüssel automatisch einer Maßnahmenklasse zugeordnet (vgl. Abbildung 12). Somit werden beispielsweise für eine zweistündige Teilstudie 240 Einzelbilder in die Bewertung einbezogen.

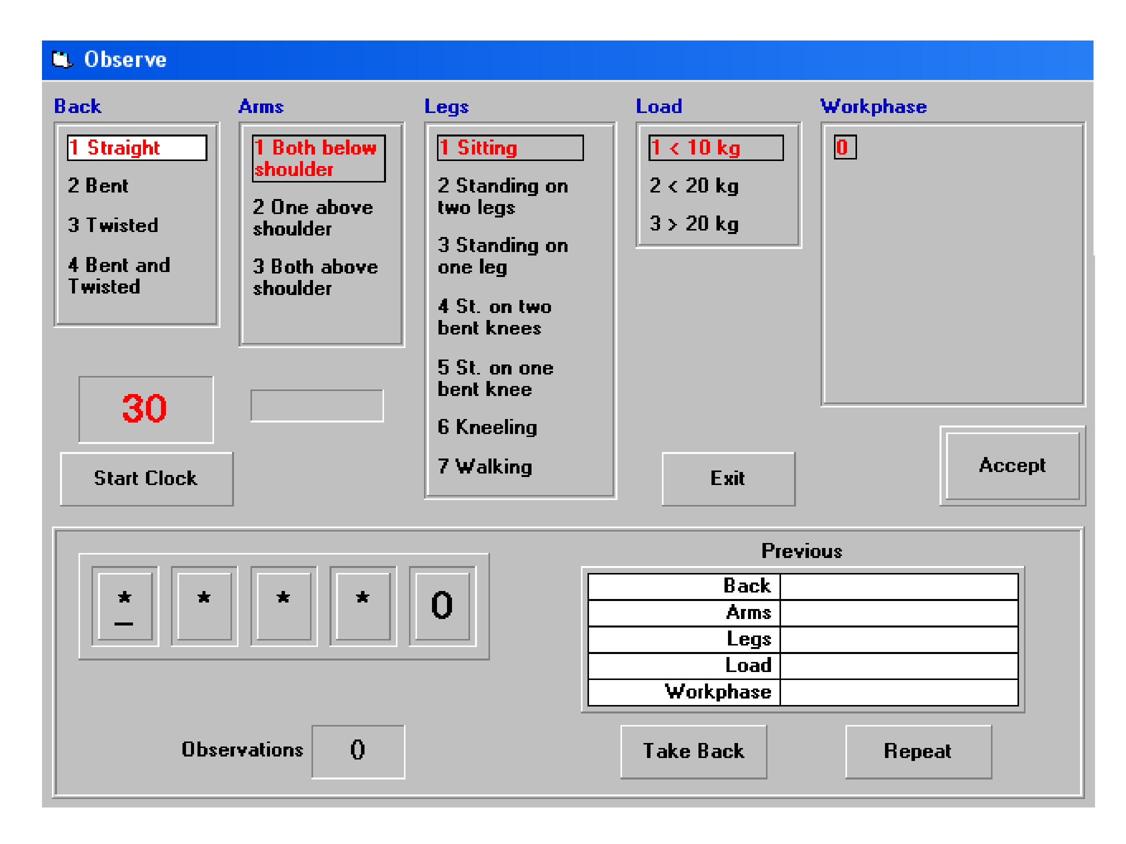


Abbildung 12: Die WinOWAS-Eingabemaske zur Feststellung des OWAS Codes und zur automatischen Zuordnung zu einer Maßnahmeklasse

Aus einer solchen Vielzahl von Einzelbeobachtungen ergibt sich eine repräsentative Stichprobe, aus der sich die Häufigkeit jeder der o. g. Maßnahmenklassen zuordnen lässt, hieraus werden nun die prozentualen Anteile jeder der vier Klassen bestimmt. Diese prozentualen Anteile (MK 1 bis MK 4) werden dann zu einem Belastungsindex L (nach Lundqvist [40]) gemäß der nachfolgenden Gewichtungsformel verrechnet.

$$L = (1 \times MK\ 1) + (2 \times MK\ 2) + (3 \times MK\ 3) + (4 \times MK\ 4)$$

Die theoretische Bandbreite für den Belastungsindex L reicht von 100 bis 400. Mit Hilfe dieses Indexes können unterschiedliche Arbeitsverfahren und einzelne Ablaufabschnitte, aber auch Tätigkeiten unterschiedlicher Branchen miteinander verglichen werden [38]. Der Belastungsindex kennzeichnet den gesamten Arbeitsablauf und stellt das eigentliche Ergebnis einer Arbeitsschwereuntersuchung dar.

Methodenvariation und Reproduzierbarkeit. Zur Bewertung der Zeitintervalle der Bildfolgen und zur Feststellung der Reproduzierbarkeit wurde das Momentaufnahmeintervall in ausgewählten Teilstudien variiert. Das geschah zum einen durch eine um 15 Sekunden zeitversetzte Auswertung bei ansonsten gleicher Anzahl Aufnahmen. Zum anderen wurden auch einzelne Teilstudien komplett in einem 15-Sekunden-Intervall ausgewertet, wodurch sich die Anzahl Bilder über den gleichen Zeitraum verdoppelte. Diese Vorgehensweise wurde bei den drei ausgewählten Untersuchungen zu den Arbeitsverfahren "Spalten mit der Axt", "Spalten mit dem Senkrechtspalter" und "Spalten mit dem kleinen Spaltautomaten" durchgeführt. Sie wurden nach den ersten Ergebnissen ausgewählt, da sie das Spektrum von wenig belastender Arbeit (kleiner Spaltautomat) bis zu stärker belastender Arbeit (Spalten mit der Axt) vollständig abdecken.

Untersuchungsobjekte. Neun verschiedene Teilbereiche der Scheitholzbereitstellung (siehe Tabelle 2) wurden mit 16 verschiedenen Probanden (Tabelle 1) untersucht. Neben einigen Studenten waren die Probanden größtenteils kleingewerbliche Produzenten, deren Brennholz auch für den Verkauf bestimmt war. Die Vielfalt an persönlichen Voraussetzungen sowie die Qualifikationen der Probanden ist in Tabelle 1 zusammengestellt. Die Probanden sind die Arbeiter aus den ebenfalls durchgeführten Einzelzeitstudien (vgl. Kapitel 4.1.3.2).

Tabelle 1: Voraussetzung und Qualifikation der eingesetzten Probanden

Proband	Größe [cm]	Gewicht [kg]	Geschlecht	Alter	Qualifikation
A	180	77	m	30	Forstingenieur (FH)
B	176	86	m	43	Hilfsarbeiter
C	185	75	m	35	Elektriker
D	178	72	m	30	Zimmermann
E	174	81	m	60	Hilfsarbeiter
F	168	69	m	65	Landwirt
G	175	78	m	53	Landwirt
H	168	51	w	23	Studentin
I	169	80	m	35	Dipl. Forstwirt
J	165	73	m	24	Student
K	175	90	m	40	Forstarbeiter
L	183	90	m	35	Maschinenbautechniker
M	183	80	m	27	Agrartechniker
N	186	88	m	24	Student
O	181	90	m	28	Dipl. Forstwirt
P	178	88	m	24	Landwirt

Insgesamt wurden neun Arbeitsabläufe über 37,7 Stunden gefilmt, für die Auswertungen wurden daraus 4213 Einzelbilder herausgefiltert (siehe Tabelle 2). Nicht alle Bilder waren für eine Auswertung geeignet, das trifft beispielsweise zu, wenn sich der Proband bei einer Aufnahme gerade aus dem Aufnahmebereich entfernt hatte. Für die Berechnung des Belastungsindexes wurden aus-

schließlich eindeutig auswertbare Fotos verwendet, die nicht auswertbaren Bilder wurden ohne Ersatz vollständig verworfen.

Tabelle 2: Anzahl der Aufnahmestunden und daraus resultierende Bilder der Untersuchung

Verfahren	Film [h]	Anzahl Bilder	Anzahl bewerteter Bilder
Holzernte	2,5	317	282
Großer Spaltautomat	2,8	350	323
Kleiner Spaltautomat	4,6	577	496
Waagerechtspalter	4,0	501	481
Senkrechtspalter	6,6	823	752
Kreissäge	2,0	248	241
Spalten mit der Axt	4,0	496	490
Bündelhilfe	3,2	400	386
Zubringen	4,0	501	364
Summe	*33,7*	*4213*	*3815*

4.3 Energieverbrauch bei der Scheitholzproduktion

Zur Abschätzung des Gesamtenergiebedarfs wurden direkte Energieverbrauchsmessungen an Maschinen für die Scheitholzaufbereitung durchgeführt. Sämtliche Messungen erfolgten in Kombination mit den Arbeitszeitstudien (vgl. Kapitel 4.1). So konnte über die dabei zugleich festgestellte Holzdurchsatzmenge und Versuchsdauer auch eine Bestimmung des spezifischen Energieverbrauchs – d. h. die auf eine Einheit Holz bezogene Energiemenge – erfolgen.

Die Energieverbrauchsmessungen erfolgten an Brennholzkreissägen, Motorkettensägen, Spaltern und Säge-Spaltmaschinen. Die Brennholzsägen wurden durchweg elektromotorisch betrieben. Bei den spaltenden Geräten sind zapfwellen- und elektromotorbetriebene Geräte zu unterscheiden. Zapfwellenbetriebene Geräte sind meist über die Dreipunktaufhängung an einen Schlepper montiert, so dass der Antrieb des Hydraulikmotors eines Spalters direkt über die Gelenkwelle des Schleppers erfolgen kann. Dadurch ist ein beweglicher Einsatz auf der Hofstelle oder im Wald möglich. Bei elektrischen Antrieben besitzt der Spalter einen Elektromotor für den Antrieb der Hydraulikpumpe. Dadurch ist der Spaltbetrieb stets auf eine Stromquelle in der näheren Umgebung angewiesen. Elektrische Antriebe werden häufig auch für große kombinierte Säge-Spaltmaschinen verwendet. Eine Energieverbrauchsmessung an einer derartigen Maschine konnte jedoch in der vorliegenden Untersuchung wegen des hierfür erforderlichen Eingriffs in die Starkstromverkabelung nicht durchgeführt werden.

Bei schlepperbetriebenen Geräten wurde der Energieverbrauch durch Messung des Dieselverbrauchs bestimmt. Dazu wurde der Kraftstofftank vor Versuchsbeginn bis zum Rand vollgetankt. Nach Versuchsende wurde der Tank mit Hilfe eines 2-l-Messbehälters erneut wieder aufgefüllt und die verbrauchte Kraftstoffmenge festgestellt. Beim Betanken wurde auf einen ebenen Untergrund geachtet. Die Ablesegenauigkeit lag bei 100 ml. Als zapfwellenbetriebene Geräte wurden zwei große Senkrechtspalter, ein großer Waagerechtspalter und eine kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine untersucht. Zusätzlich wurden Messungen an Geräten mit aufgebauten Verbrennungsmotoren durchgeführt. Hierbei handelte es sich um eine große kombinierte Säge-Spaltmaschine.

Die Messung der Kettensäge erfolgte im Wald bei der Betankung auf einer ebenen Forststraße. Es wurde die benötigte Menge des Zweitaktgemisches und des Schmieröls gemessen.

Bei elektrisch angetriebenen Geräten wurde ein Stromverbrauchsmessgerät zwischen der Stromquelle und dem jeweiligen Gerät eingebaut. Hierbei handelte es sich um das Drei-Phasen-Messgerät TM 39 von ZES Zimmer Electronic Systems. Es wird mittels Standardsteckdosen (240 bzw. 400 V) angeschlossen und misst die Wirkenergie auf 1/100 kWh mit einer Genauigkeit von 0,5 % [59]. Vor und nach der Holzbearbeitung wurde der jeweilige Zählerstand der Digitalanzeige abgelesen und anschließend der jeweiligen Benutzungsdauer sowie der produzierten Holzmenge zugeordnet. Die Ergebnisse sämtlicher Messungen sind in Kapitel 5.4 dargestellt.

4.4 Bestimmung von Raummaßen für Scheitholz

4.4.1 Untersuchte Raummaße

Da der Raummeter nicht von den SI-Basiseinheiten (Système International d'Unités) abgeleitet werden kann, sondern nur der Kubikmeter (m³), herrscht Unklarheit darüber, wie der Raummeter (Rm) verwendet werden soll. Deswegen werden im Folgenden die unterschiedlichen hier untersuchten Einheiten definiert.

Festmeter (Fm) oder Kubikmeter (m³). Der Festmeter ist ein forstlicher Begriff für den Kubikmeter und bezeichnet das Raummaß für Holz, beispielsweise für Langholz. Ein Festmeter entspricht folglich der Menge kompakten Holzes, gleich einem Würfel mit der Kantenlänge 1 m, den man aus einem Baumstamm sägen würde. Um eine Verwechslung mit dem Fermi (1 fm = 10^{15} m) zu unterbinden, sollte man den Festmeter mit einem großen F also Fm abkürzen.

Raummeter aus Meterscheitholz geschichtet (Ster). Der Raummeter (auch "Ster" genannt) entspricht dem Raummaß für meterlanges geschichtetes und gespaltenes Scheitholz, welches über eine Breite und Höhe von je einem Meter gemessen wird (Abbildung 13). Er beinhaltet auch die Luftzwischenräume (Grafik B in Abbildung 15). Bei diesem Maß handelt es sich häufig um das Standardmaß für den Brennholzverkauf.

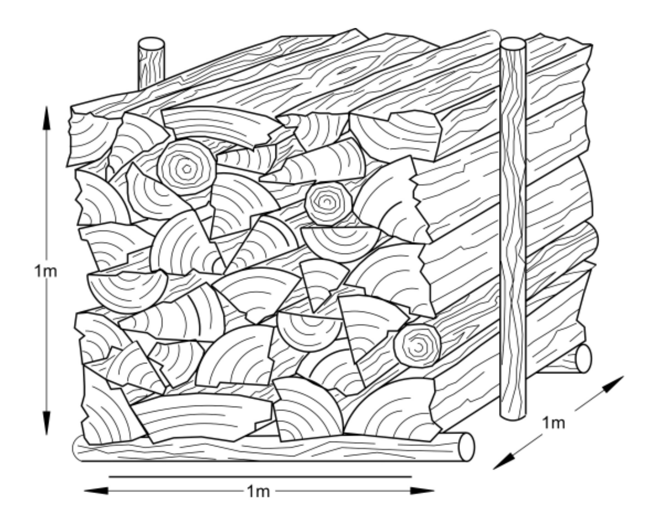


Abbildung 13: Der Raummeter Brennholz (Rm) [18]

Raummeter (Rm) Rundlinge (ungespalten). Der Raummeter aus ungespaltenen "Rundlingen" (Grafik A in Abbildung 15) wird in gleicher Weise gemessen, wie bei gespaltenen und geschichteten Meterholzscheiten. Auch hierbei zählt der Luftzwischenraum zum gemessenen Volumen dazu.

Meterscheitholz kreuzweise geschichtet. Bei diesem Raummaß wird das Meterscheitholz auf einer Grundfläche von einem Quadratmeter nebeneinander gelegt. Weitere solche Holzlagen werden abwechselnd um 90° versetzt aufeinander gestapelt (Abbildung 14). Beim kreuzweise geschichteten Meterholz handelt es sich nicht um ein Verkaufsmaß, sondern um eine Lagerform, die oft zur Stabilisierung der Seiten verwendet wird.



Abbildung 14: Der Raummeter aus Meterscheitholz, kreuzweise geschichtet

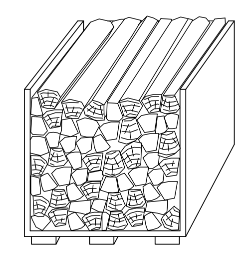
Raummeter aus geschichteten 33 cm Kurzscheiten. Dieses Raummaß umfasst das Volumen von drei hintereinander geschichteten Stapeln mit Scheitholz der Länge 33 cm auf einer Fläche von einem Quadratmeter und in einer Höhe von einem Meter (Grafik C in Abbildung 15).

Schüttraummeter mit 33 cm Kurzscheiten. Hierbei handelt es sich um Holzscheite mit meist 33 cm Länge, die lose geschüttet werden (z. B. von einem Förderband in einen Behälter) und den Raum von einem Kubikmeter ausfüllen. In Abbildung 15 sind hierzu zwei unterschiedliche Varianten dargestellt, der Schüttraummeter in der Gitterbox (Grafik D) und in einem glattwandigen Messrahmen (Grafik E).

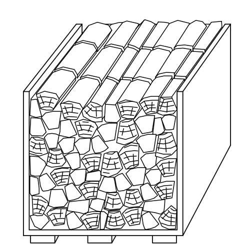
A Meterholz ungespalten ("Rundlinge"), gestapelt



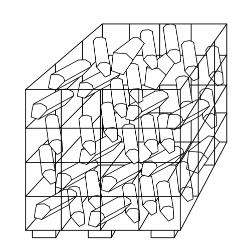
B Meterholz gespalten gestapelt



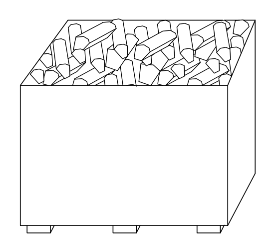
C Scheitholz 33 cm gestapelt



D Scheitholz 33 cm lose in Gitterbox



E Scheitholz 33 cm lose in Kiste



F Meterholz gespalten kreuzweise geschichtet

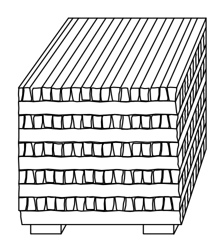


Abbildung 15: In Stapel- und Schüttversuchen betrachtete Raummaße für Brennholz

4.4.2 Verwendete Messgeräte

Für die Bestimmung der Raumdichten von verkaufsfähigen Scheitholzsortimenten wurde ein spezieller Standard-Messrahmen für Stapel und Schüttgut-Scheite erstellt (Abbildung 16). Damit konnte eine einheitliche Bestimmung repräsentativer und wiederholbarer Messwerte für die Raumdichte der in Kapitel 4.4.1 genannten Brennholzsortimente erfolgen. Der Messrahmen wird von einem Stahlgestänge stabilisiert, durch den Deformationen des Behälters infolge unterschiedlicher Scheitgewichte vermieden werden. Zur Verschalung wurden Betoplan-Platten angebracht, deren glatte Oberfläche ein Verkanten einzelner Scheite an der Außenwand verhindert. Die Vorder- und Hinterwand lässt sich bei Bedarf entfernen. Mit Ösen an den vier oberen Ecken lässt sich der gefüllte Rahmen über Stahlseile zur Bestimmung der Bruttomasse an einer Hängewaage aufhängen. Die Grundflächen-Innenmaße von 110 cm x 120 cm entsprechen weitgehend den Maßen eines übliches Behältnisses für die Scheitholzbevorratung, es entspricht dem einer Gitterbox bestehend aus einer Euro-Palette, die umrandet mit Baustahlgewebe umfasst wurde. Die Höhe wurde mit 200 cm ebenfalls in Anlehnung an derartige Umschlagsbehälter gewählt; das Leergewicht betrug 203 kg. Um praxisnahe Werte zu erhalten, wurden die geschütteten Werte zusätzlich noch in einer Gitterbox mit den Abmessungen 100 cm x 120 cm x 200 cm erhoben (zur Gitterbox vgl. Abbildung 19), wobei es sich bei den Behälterwandungen um ein Baustahlgitter mit 15 x 15 cm Sprossenabstand handelte. Das Leergewicht dieser Gitterbox lag bei 50 kg.



Abbildung 16: Der Messrahmen für die Bestimmung der Scheitholz Raummaße

Für die Bestimmung der Messoberkante im Füllbehälter wurde eine Wasserwaage eingesetzt. Die damit ermittelte Stapelhöhe wurde mit einem Maßband festgestellt. Die Holzmenge in Festmetern wurde an den Rundlingen durch eine Kreuzkluppung des Mittendurchmessers ermittelt. Eine Kluppe ist ein forstliches Messgerät zur Ermittlung eines Durchmessers von Rundholz (siehe Abbildung 17). Die Ablesegenauigkeit beträgt dabei 1 cm, der Messwert wurde gemäß der allgemeinen forstüblichen Praxis abgerundet. Bei einer Kreuzkluppung erhält man den Mittendurchmesser als Mittelwert zweier um 90° verschobenen Messungen mit einer Kluppe. So können Messfehler bei ellipsenförmigen Rundlingen vermindert werden. Über die konstante Länge der Rundlinge (1 m) kann aus dem gemessenem Mittendurchmesser das Festmetervolumen errechnet werden.

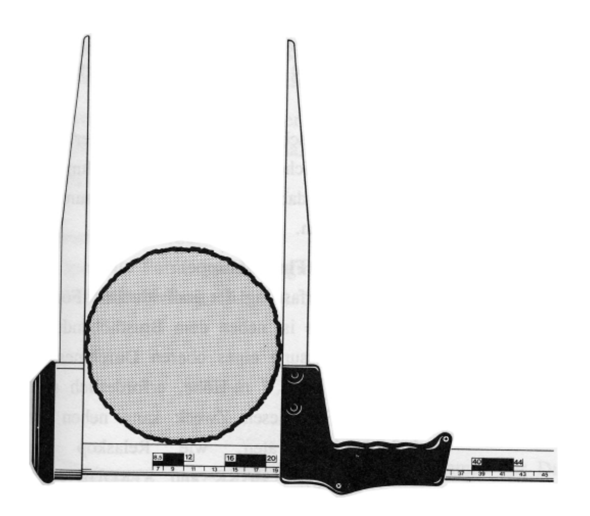


Abbildung 17: Die Kluppe [36]

4.4.3 Untersuchte Holzarten und Aufbereitungen

Untersucht wurde Brennholz der Baumarten Fichte (Picea Abies) und Buche (Fagus sylvatica) in den Sortimenten:

- 1 m Rundlinge ungespalten
- 1 m gespaltene Scheite
- 0,33 m gespaltene Scheite

Für die Messungen im Versuch wurden je Baumart sechs Raummeter Holz beschafft; sie wurden zunächst als waldfrisch geschnittene Rundlinge mit einem Durchmesser zwischen 7 und 20 cm in den Messrahmen eingeschichtet. Nach einer anschließenden sechsmonatigen abgedeckten Lagerung wurde das gleiche Holz im lufttrockenen Zustand (unter 20 % Wassergehalt) erneut für eine Volumenbestimmung eingeschichtet. Im Durchschnitt lagen die Durchmesser bei der Fichte bei 11,7 cm und bei der Buche bei 12,2 cm. Der Anfangs- und Endwassergehalt wurde gemäß der in Kapitel 4.5.4.2 beschriebenen Methode festgestellt.

Der Anfangswassergehalt des waldfrischen Fichtenholzes lag bei 50 %, während das frische Buchenholz mit 40 % Wassergehalt etwas trockener war. Die abgelagerten Rundlinge wiesen – wie

auch im Lagerungsversuch in Kapitel 5.5 bestätigt wird – einen für die Lagerdauer von sechs Monaten typischen Wassergehalt von 24 bzw. 28 % auf, während die gespaltenen mit 17 bis 20 % Wassergehalt (Tabelle 3) schon als ofenfertig bezeichnet werden können. Aufgrund der relativ ungünstigen Trocknungsbedingungen (schattigen, windarme Lage am Gewässer) ist dieser Trocknungsfortschritt bei der Buche aber etwas geringer als in den eigentlichen Lagerungsversuchen (vgl. Kapitel 5.5).

Da eine Schrumpfung des Holzes vor allem bei Wassergehalten zwischen dem absolut trockenen Zustand (atro) und dem Fasersättigungspunkt stattfindet [39], ist davon auszugehen, dass sie bei den hier untersuchten Hölzern nur in untergeordneter Größenordnung eingetreten ist. Der Fasersättigungspunkt liegt bei zerstreutporigen Laubhölzern wie etwa der Buche bei 24 bis 26 % Wassergehalt und bei Nadelhölzern ohne ausgeprägten Kern, wie der Fichte, bei 23 bis 25 % (Werte für den Wassergehalt berechnet aus den Angaben für die Holzfeuchte in [39]).

Tabelle 3: Wassergehalte des für die Bestimmung der Raummaße verwendeten Holzes (Lagerung unter schattigen, windarmen Bedingungen am Gewässer)

	Wassergehalt im Frühjahr (Mai)			Wassergehalt im Herbst (Oktober)		
	Rundlinge ungespalten	Meterscheite gespalten	33 cm gespalten	Rundlinge ungespalten	Meterscheite gespalten	33 cm gespalten
Buche	39,7 %	39,7 %	39,7 %	28,4 %	19,9 %	16,8 %
Fichte	50,8 %	50,8 %	50,8 %	24,4 %	18,4 %	17,1 %

4.4.4 Versuchsplan und Messdurchführung

Versuchsplan. Mit den in Kapitel 4.4.3 vorgestellten Holzarten und Aufbereitungsformen wurden sowohl im Frühjahr als auch im Herbst jeweils die sechs genannten Raummaße bestimmt (vgl. Kapitel 4.4.1), wobei insgesamt je Holzart zunächst nur Rundlinge (6 Chargen à 1 Rm) eingesetzt wurden. Diese Chargen wurden nach den Messungen als Rundholz zum Teil weiter aufgearbeitet (Spalten bzw. Sägen) und für weitere Raummaßbestimmungen erneut verwendet. Zu jeder der Versuchsvarianten bzw. Chargen wurde die Messung zweimal wiederholt (außer kreuzweise Schichtung: einfache Messung), das heißt, dass jede Probe insgesamt dreimal in den Messrahmen oder in die Gitterbox eingestapelt bzw. eingeschüttet wurde, so dass insgesamt 238 Messungen durchgeführt wurden. Eine Übersicht über diese Messungen zeigt Tabelle 4.

Die im Frühjahr und Herbst durchgeführten Wassergehaltsbestimmungen für die verwendeten Chargen erfolgte gemäß der in Kapitel 4.5.4.3 vorgestellten Methodik. Für die Probenentnahme aus den Scheiten wurde eine Kreissäge verwendet.

Tabelle 4: Versuchsplan für die Raummaßbestimmung der Buchen(Bu)- und Fichten(Fi)-proben (je Holzprobe drei Wiederholungen, außer kreuzweise Stapelung: 1 Messwert) sowie Schritte der Messdurchführung

Zeit-punkt	Sortiment	Holzproben												Schritt
		Bu1	Fi1	Bu2	Fi2	Bu3	Fi3	Bu4	Fi4	Bu5	Fi5	Bu6	Fi6	
Frühjahr	Rundlinge	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1
	Meterscheite gespalten					X	X	X	X	X	X	X	X	2
	Meterscheite kreuzweise					X	X	X	X	X	X	X	X	3
	33 cm Scheite geschichtet									X	X	X	X	4
	33 cm Scheite geschüttet im Messrahmen									X	X	X	X	5
	33 cm Scheite geschüttet in der Gitterbox									X	X	X	X	6
Herbst	Rundlinge	X	X	X	X									7
	Meterscheite gespalten	X	X	X	X	X	X	X	X					8
	Meterscheite kreuzweise	X	X	X	X	X	X	X	X					9
	33 cm Scheite geschichtet	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	10
	33 cm Scheite geschüttet im Messrahmen	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	11
	33 cm Scheite geschüttet in der Gitterbox	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	12

Die Messdurchführung. Zu Beginn wurden die verwendeten Chargen als Rundlinge zu Raummeterbündeln zusammengefasst und gewogen (vgl. Kapitel 4.4.2). Die Versuchsvarianten bzw. Chargen wurden in der Messabfolge untersucht, wie sie in Tabelle 4 als "Schritte" zusammengestellt ist. Zunächst wurden die ungespaltenen Buchen- und Fichtenmeterstücke (insgesamt 12 Raummeter) in den Messrahmen geschichtet (Schritt 1). Dazu blieb die hintere Wand geschlossen, damit das Holz hinten gleichmäßig an der Wand anlag. Die Rundlinge wurden oben horizontal verteilt, so dass sich eine weitgehend waagerechte Fülllinie ergab. Zur Füllhöhenbestimmung wurde nun eine Messlatte im obersten Punkt mit der Wasserwaage horizontal ausgerichtet. An der Unterkante der Messlatte wurde schließlich mit einem Maßband oder Zollstock die Füllhöhe abgelesen (Abbildung 18). Ungefüllte Zwischenräume zählen dabei wie auch an den Seitenflächen zum gemessenen Volumen.

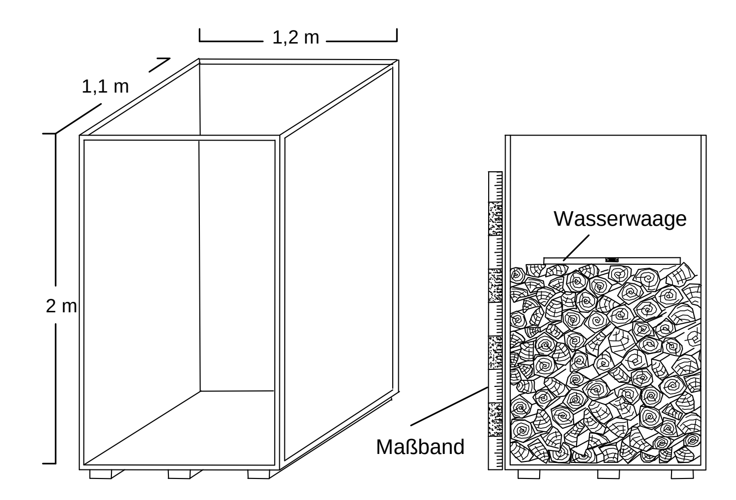


Abbildung 18: Höhenmessung für die Volumenbestimmung im Standard-Messrahmen

Die für die Volumenbestimmung erforderliche Breite war durch die Rahmenbreite vorgegeben. Bei der Länge des Stapels wurde ohne weitere Messung von einem Meter Holzlänge ausgegangen (Meterscheite). Nach der Füllhöhenbestimmung wurde das Holz komplett aus dem Messrahmen entfernt und der Rahmen wurde erneut befüllt und gemessen. Dies wurde wiederholt, bis zu jeder Charge insgesamt drei Messungen vorlagen. Ein Teil der Rundlinge (2 Rm je Holzart) wurde anschließend gebündelt und im Freien abgedeckt über ca. sechs Monate bis zum Herbst gelagert. Zuvor waren sämtliche Holzstücke gezählt und mit einer je nach Sortiment einheitlichen Farbe markiert worden, um eine lückenlose Durchführung aller Messungen mit immer demselben Holz, d. h. mit dem einheitlichen Ausgangsvolumen eines Raummeters (Rundlinge), zu gewährleisten. Die durchgeführte Überprüfung zeigte, dass es zwischenzeitlich nicht zum Verlust oder Diebstahl von einzelnen Holzstücken gekommen war.

Eine Gewichtsbestimmung war nicht erforderlich, da sie für die hier angestrebte Feststellung von Umrechnungsfaktoren unerheblich ist. Aufgrund des erfassten Gesamtgewichts der Raummeterbündel und der Wassergehalte vor und nach der Lagerung war aber eine Berechnung der tatsächlichen Raumgewichte für die hier verwendeten Holzarten und Probenherkünfte möglich (vgl. Kapitel 5.5.7).

Die nach Abzug der je Holzart eingelagerten Rundlinge (4 Rm) verbliebene Holzmenge (8 Rm) wurde unmittelbar anschließend zu Meterscheitholz gespalten und danach wie beschrieben für die erneute Stapelung und Bestimmung im Messrahmen verwendet (Schritt 2 in Tabelle 4). Es handelte sich also um dasselbe Holzes (in exakt derselben Menge), das schon bei den Rundling-Stapelversuchen verwendet worden war, allerdings wurden nun weniger Chargen eingesetzt.

Für die weiteren Messungen wurden die gespaltenen Meterscheite im dritten Schritt kreuzweise geschichtet (vgl. Kapitel 4.4.1). Diese Art des Stapelns wird oft am Rande eines Holzstoßes eingesetzt, da sie eine erhöhte Seitenstabilität bietet, die ein Auseinanderfallen der Scheite verhindert. Hierzu wurde der Messrahmen nicht verwendet, die Stapelung fand auf einer einfachen Grundfläche statt und die Höhe wurde wie oben beschrieben festgestellt. Für die Volumenberechnung wurde eine Grundfläche von 1 x 1 m verwendet. Im Gegensatz zu den übrigen Messungen wurden diese Versuche nicht wiederholt.

Nach den Messungen wurde die Charge mit gespaltenen Meterscheiten erneut geteilt; zwei der vier Raummeter wurden bis zum Herbst gelagert und die übrigen 2 Rm je Baumart wurden zu 33 cm Scheiten gesägt. Diese Scheite wurden nun für die übrigen Volumenmessungen verwendet (Schritt 4, 5 und 6).

Für das Raummaß der geschichteten 33-er Scheite wurde der Messrahmen ohne Stoßfuge in drei Reihen hintereinander aufgefüllt, wobei die Scheite an der hinteren Wand des Messrahmens anlagen. Bei der Füllhöhenbestimmung wurde wie beim Meterholz vorgegangen. Die Stapelbreite war durch die Rahmenbreite vorgegeben und bei der Länge des Stapels im Messrahmen wurde ohne weitere Messung von einer auf einen Meter aufaddierten Stapellänge ausgegangen, d. h. es wurde unterstellt, dass jeweils drei 33-er Scheite hintereinander liegend eine Länge von einheitlich einem Meter einnehmen.

Im fünften Schritt wurde dann der Messrahmen an den Seiten komplett geschlossen und die 33-er Scheite wurden über ein Förderband aus konstant 2,5 m Höhe in den Messrahmen abgeworfen (Abbildung 19). Die Messung der Füllhöhe dieser lose geschütteten Scheite erfolgte nachdem die Scheite noch horizontal verteilt wurden. Der sechste Schritt bestand dann in der Bestimmung der Schüttraummaße mit einer Baustahl-Gitterbox wie in Abbildung 19 gezeigt (vgl. Kapitel 4.4.2).



Abbildung 19: Befüllen der Gitterbox für die Schüttvolumenbestimmung

Die Schritte sieben bis zwölf wurden analog zu den Messungen der Schritt 1 bis 6 durchgeführt. Dies erfolgte nach der 6-monatigen Lagerung von Mai bis Oktober; dadurch sollte eventuellen

Veränderungen durch die Lagerung Rechnung getragen werden. Sämtliche gelagerten Partien wurden auch hier zuvor gewogen. Durch die Bündelung und farbliche Markierung der Meterhölzer war sichergestellt, dass exakt dieselbe Chargengröße der Frühjahrsmessung auch für die Herbstmessung verwendet wurde, so dass keine Vermischung der Chargen stattfand und eine Gegenüberstellung der Messtermine (Wassergehalte) möglich war. Außerdem konnte ein Materialverlust, der die Ergebnisse verfälscht hätte, somit ausgeschlossen werden.

Die zunehmende Vielzahl von im Herbst für jeden Messschritt untersuchten Chargen (Tabelle 3) ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die gelagerten Rundhölzer aber auch die gespaltenen Meterscheite nach der Bestimmung im Standard-Messrahmen noch zum Teil mehrfach aufbereitet wurden (Spalten bzw. Sägen), um damit weitere Messvarianten bei ansonsten gleichbleibenden Holzeigenschaften (Rohdichte, Wassergehalt, Ausgangsdurchmesser) zu ermöglichen.

4.5 Bestimmung der Wassergehaltsänderungen und der Lagerungsverluste

4.5.1 Verwendete Holzarten und Sortimente

Die drei Holzarten, die in Deutschland den größten Anteil an der Baumartenzusammensetzung haben [29] wurden untersucht:

- Fichte (picea abies)
- Buche (fagus sylvatica)
- Kiefer (pinus sylvestris)

d. h. zweimal Weichholz (Fi, Kie) und einmal Hartholz (Bu). Bei der Wahl der Holzchargen für die Versuche wurde auf frisches, homogenes und gesundes Material geachtet. Das Holz für den Lagerstandort Freising stammte aus Durchforstungen der Wälder um Freising und für den Standort Allgäu aus der Umgebung von Kempten.

Drei verschiedene Sortimente wurden unterschieden:

- ungespalten (1-Meter-Scheite, Fichte und Buche)
- gespalten (1-Meter-Scheite, Fichte, Buche und Kiefer)
- gespalten (33 cm Scheite, Fichte und Buche)

4.5.2 Lagergestaltung

Mit einer Vorrichtung, wie in Abbildung 20 dargestellt, wurden runde Bündel aus Scheitholz mit einem Volumen von jeweils 0,5 Raummeter erstellt. Dafür wurden die Scheite in die rundgeformte Bügelhilfe gelegt. Ist diese gefüllt, kann man das Bündel mit Hilfe eines Spanngurtes zusammenzurren. Dann folgt das Verschnüren mit einem UV-Licht-beständigen Garn links und rechts der Haltebügel. Nach dem Verschnüren werden die Bügel am Verschluss oben geöffnet, so dass diese nun aus zwei Halbbügeln bestehen. Eine Hälfte wird aus der Halterung gehoben und zur Seite gelegt. An den verbleibenden halben Bügeln wird nun die Vorrichtung von Hand zur Seite gekippt, so dass das verschnürte Rundbündel aus der Vorrichtung herausgerollt werden kann.

Für den Lagerversuch wurde nun zusätzlich in der Mitte zwischen den seitlichen Garnwicklungen ein aus vierfach umwickeltem Garn bestehender Tragegurt gebildet, der ausschließlich dazu diente, die Bündel zum Wiegen aufzuhängen, ohne dass dies an den beiden äußeren Garnwickeln geschehen musste. Von den äußeren Garnwickeln wurde das Bündel somit ausschließlich zusammengehalten, wodurch eine besonders feste Verpackung mit nur geringer Reibung der Scheite untereinander erreicht wurde. Dies war erforderlich, um ein Abschaben des Holzes bei den wiederholten Gewichtsbestimmungen der Bündel zu vermeiden und somit vermeintliche Trockenmasseverluste zu reduzieren. Wurden diese Haltegarnstränge auf Grund von Schrumpfung des trocknenden Holzes zu locker, konnte ein Nachspannen erfolgen.

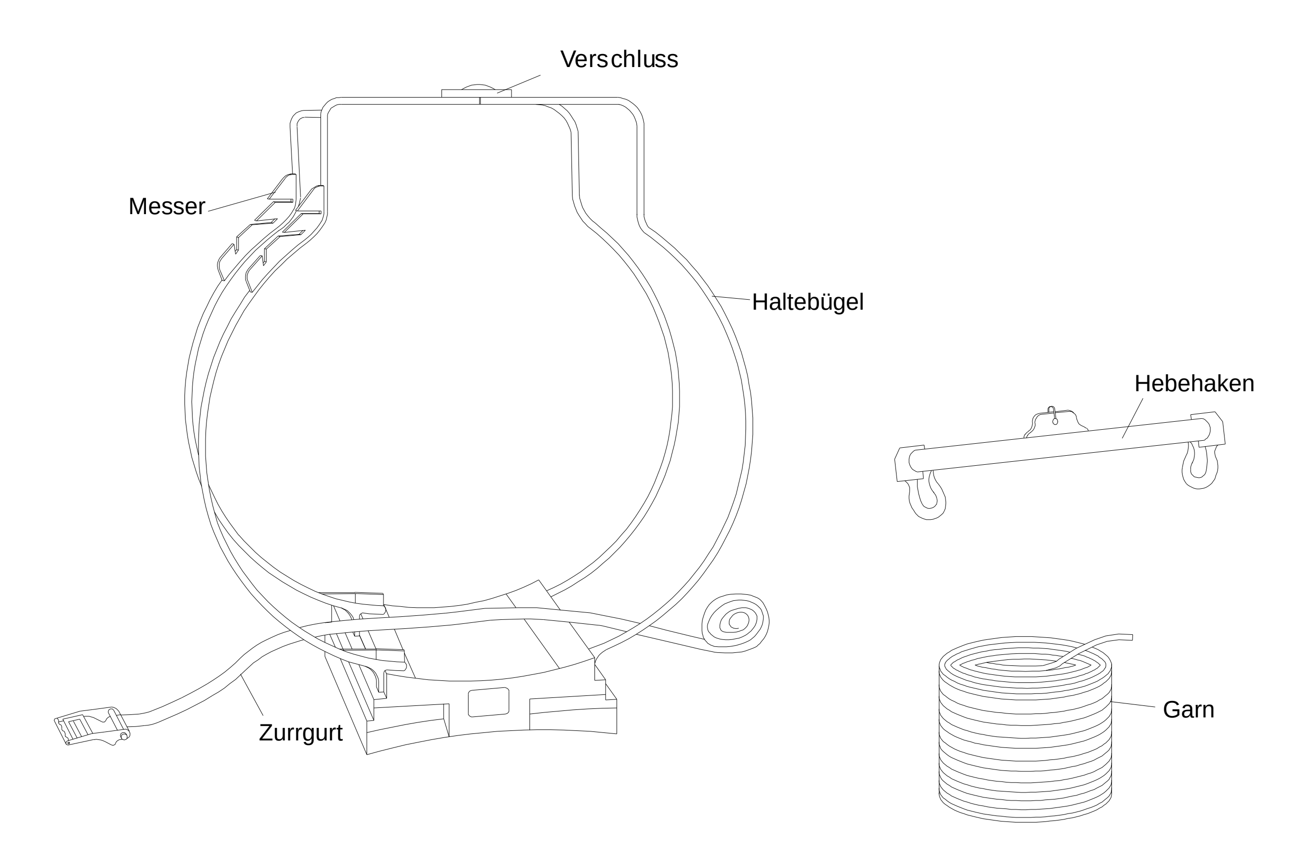


Abbildung 20: Bündelhilfe entweder für 0,5 Rm oder 1 Rm Scheitholz

Die Rundbündel wurden schließlich in drei Lagen übereinander gestapelt, so dass ein Holzstoß jeweils ca. zwei Meter Höhe und ca. sechs Meter Länge aufwies (Abbildung 21). Zusätzlich wurden 33 cm lange Scheite in Gitterboxen geschüttet aufbewahrt. Die Lagerung fand zum einen im Freien, und zum andern unter Dach in einer Maschinenhalle statt, die nach einer Seite hin offen und auf der anderen Seite nicht vollständig mit Holzplanken bis zum Boden hin verkleidet worden war, so dass über einen freien Spalt von ca. 30 cm Höhe ein ausreichender Luftzutritt sicher gestellt war.

Einer der beiden im Freien errichteten Holzstöße wurde mit einer 1,5 m breiten LKW-Plane abgedeckt, welche oben mit einzelnen Scheiten beschwert wurde. Ein anderer Holzstoß war nicht abgedeckt und so der Witterung ungeschützt ausgesetzt. Die Gitterboxen lagerten ausschließlich im Freien nebeneinander, einmal abgedeckt und einmal nicht abgedeckt. Alle Holzstöße lagerten auf Rundholzstangen um einen Nässeschutz nach unten zu bieten und eine gute Luftzirkulation zu gewährleisten. Darunter war eine 1,5 m breite LKW-Plane ausgelegt worden. An der Seite wurden die Holzstöße durch ein Holzgestänge gestützt. Die zwischen den runden Bündel gebildeten Zwischenräume wurden mit einzelnen Scheiten gefüllt, um einen homogenen Holzstoß zu erhalten. Weiter wurden einzelne Scheite neben den Holzstößen gelagert, um Probenmaterial für Untersuchungen zur Wassergehaltsverteilung innerhalb der Scheite zurückzubehalten.

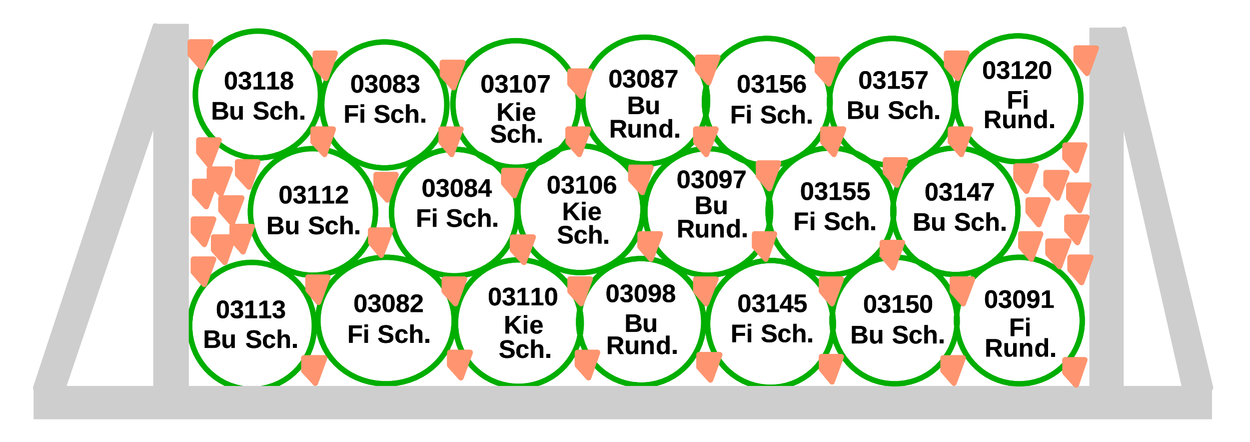


Abbildung 21: Ein Beispiel einer Lageranordnung der Meterscheitholzbündel am Standort Freising: hier nicht abgedeckte Lagerung außen

4.5.3 Lagerstandorte und Versuchsdurchführung

Die beiden Versuchsstandorte waren leicht erreichbar und repräsentierten unterschiedliche klimatische Verhältnisse in Bayern (zu den gemessenen Klimadaten vgl. Kapitel 5.5). Ein Lager wurde auf dem Versuchsgut Dürnast nahe Freising errichtet (Hauptversuch); als Zusatzstandort wurde der Biomassehof Allgäu in Kempten gewählt. Am Lagerort waren ein Radlader bzw. ein Gabelstapler verfügbar, sie wurden bei der wiederholten Gewichtsbestimmung für das Anheben der Bündel an einer Wiegezelle verwendet. Jedes Bündel wurde mit einer Nummer markiert und war damit eindeutig gekennzeichnet. Eine Übersicht über die an den beiden Standorten eingelagerten Versuchsbrennstoffe zeigt Tabelle 5.

Tabelle 5: Übersicht über die im Lagerversuch eingesetzten Holzarten und Sortimente

Holzart	Sortiment	Hauptstandort Freising			Zusatzstandort Kempten	
		Außen, unabgedeckt	Außen, abgedeckt	im Gebäude	Außen, unabgedeckt	Außen abgedeckt
Fichte	1-m-ungespalten	X	X	X		
	1-m-gespalten	X	X	X	X	X
	33-cm gespalten	X	X			
Buche	1-m-ungespalten	X	X	X		
	1-m-gespalten	X	X	X	X	X
	33-cm gespalten	X	X			
Kiefer	1-m-ungespalten					
	1-m-gespalten	X	X			
	33-cm gespalten					

Aufgrund der Erweiterung des Versuchs nach einem Jahr und der unterschiedlichen Sortimente und Lagerarten wurden am Hauptversuchsstandort Freising insgesamt 54 Meterholz-Bündel

(23 Fichte, 25 Buche, 6 Kiefer) à 0,5 Rm benötigt und am Nebenversuchsstandort Kempten 16 Bündel à 0,5 Rm (8 Fichte, 8 Buche). Zusätzlich lagerten in Freising vier Gitterboxen mit 33 cm Scheiten geschüttet, die aus vier 0,5 Rm Bündel (2 Fichte, 2 Buche) hervorgingen.

Durchführung. Die Einlagerung (Versuchsbeginn) fand am Hauptstandort Freising im Dezember 2002 statt. Im darauffolgenden Februar wurde dann der zweite Versuchstandort in Kempten errichtet. Die Erweiterung für eine zweite Messperiode begann an beiden Standorten im November 2003. Für beide Versuchsstandorte und für beide Lagerungsperioden war der Endpunkt der Lagerung im November 2004 erreicht. Dabei konnte vor Ort auf geeignete Fahrzeuge mit Hebeeinrichtung (Frontlader, Gabelstapler) zurückgegriffen werden. Auch in anderen technischen und organisatorischen Belangen wurde die Versuchdurchführung von den Betriebsleitern des Versuchsgutes Dürnast bzw. vom Biomassehof Allgäu wirkungsvoll unterstützt.

4.5.4 Probenahme und Messmethodik

Die im Lagerungsversuch betrachteten Fragestellungen waren im Wesentlichen durch Gewichts- und Massenbestimmung an den Holzsortimenten zu bearbeiten. Hierbei handelt es sich jedoch nur scheinbar um eine leicht lösbare messverfahrenstechnische Aufgabe. Aufgrund der großen Gesamtmassen und der Grobstückigkeit des Probenmaterials konnte bei der Probennahme und bei den eingesetzten Messverfahren nicht auf Standarderfahrungen und -verfahren zurückgegriffen werden. Insbesondere zu Fragen der Repräsentativität der Probennahme und der erforderlichen Trocknungsdauer bei der Wassergehaltsbestimmung lagen für Scheitholz bislang noch keine relevanten Erfahrungen vor. Daher mussten hierzu einige umfangreiche Vorversuche durchgeführt werden, welche die Basis für die Messdurchführung bzw. für die Datenauswertung liefern sollten. Die Ergebnisse dieser Vorversuche werden in den nachfolgenden Kapiteln 4.5.4.1, 4.5.4.2 und 4.5.4.3 vorgestellt.

4.5.4.1 Erforderliche Trocknungsdauer (Vorversuch)

Bei der hier vorliegenden Versuchsfrage kam es auf eine möglichst genaue und zuverlässige Bestimmung der Anfangs- und Endwassergehalte der eingelagerten Holzsortimente an. Daher musste zunächst die bei Holzscheiten erforderliche Mindesttrocknungsdauer ermittelt werden.

In einem entsprechenden Vorversuch wurden frische Buchenholzproben aus Holzscheiten entnommen. Bei diesen Proben handelte es sich um etwa vier bis fünf Zentimeter breite Stücke mit einem Gewicht von jeweils ca. 200 bis 400 g. Sie wurden gemäß prCEN/TS 14 [16] auf flachen Aluminiumschalen bei 105°C im Trockenschrank getrocknet, wobei die Proben in regelmäßigen Zeitabständen gewogen wurden. Die Ergebnisse in Abbildung 22 zeigen, dass die größten Proben über ca. 40 Stunden im Trockenschrank bei 105°C verweilen müssen, bis keine Gewichtsveränderung mehr eintritt und die Proben somit als absolut trocken gelten konnten. Mit dieser Kenntnis wurde die Trocknungszeit für sämtliche Proben auf 48 Stunden festgelegt.

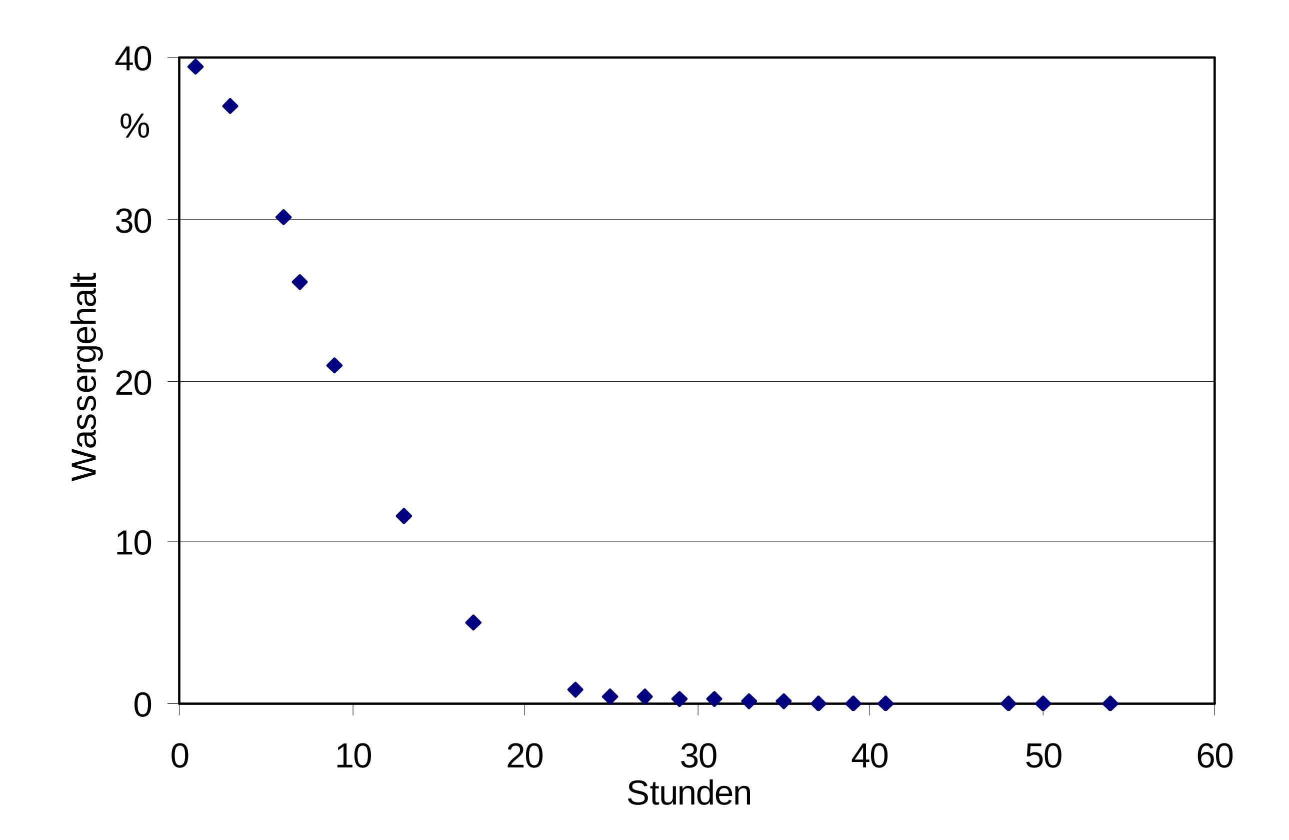


Abbildung 22: Verlauf des Wassergehalts einer Buchenholzprobe im Trockenschrank bei 105 °C

4.5.4.2 Probenahme zur Wassergehaltsbestimmung (Vorversuch)

Aufgrund der großen Zahl der erforderlichen Wassergehaltsproben, die aus den einzelnen Scheiten zu entnehmen waren, war der Einsatz einer Handsäge wegen des unverhältnismäßig großen Zeitbedarfs nicht möglich. Daher musste in einem Vorversuch untersucht werden, ob die Verwendung einer Kreissäge oder einer Motorsäge das Messergebnis für die Bestimmung des Wassergehalts beeinflussen kann.

Als Ausgangsmaterial für die Überprüfung wurde Scheitholz mit einem Meter Länge als Rundling und als gespaltener Scheit ausgewählt. Es handelte sich um eine waldfrische Probe, die gesägt und gespalten wurde, wobei darauf geachtet wurde, dass es sich um astfreies Material handelte, um Wassergehaltsschwankungen im Holz gering zu halten. Es wurden Proben von Fichte (picea abies) und Esche (fraxinus excelsior) untersucht. Dabei wurde wie folgt vorgegangen.

Mit jedem Sägentyp (Bügelsäge, Motorsäge, Kreissäge) wurde eine drei bis vier Zentimeter dicke Scheibe (Prüfling) abgesägt. Dies geschah immer abwechselnd, wobei zwischen den einzelnen Proben ein dünner ca. ein bis zwei Zentimeter breiter Streifen verblieb, damit jeder Prüfling zwei Schnittflächen vom gleichen Sägentyp erhielt (Abbildung 23). Insgesamt wurden so 92 Proben gewonnen, die sofort nach dem Trennschnitt in luftdichte Kunststoffbeutel verpackt wurden, bevor sie gewogen wurden.

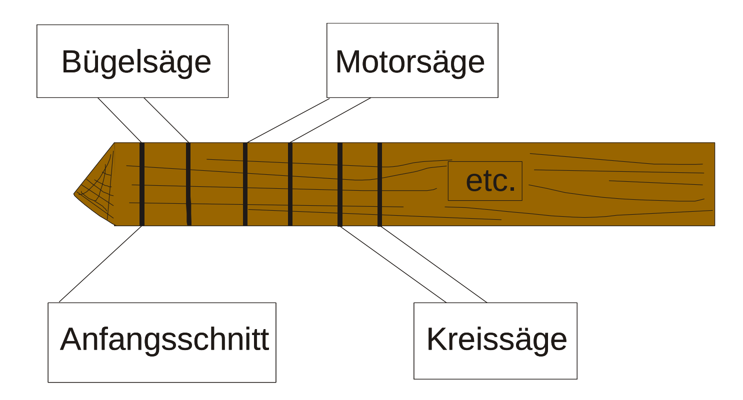


Abbildung 23: Schnittfolge für die Probenahme

Anschließend wurde der Wassergehalt im Trockenschrank bei 105 °C bestimmt. Bei der Bestimmung des Einflusses der unterschiedlichen Sägen auf die Probennahme wurde eine maximal Abweichung der einzelnen gemessenen Wassergehalte von 2 %-Punkten festgestellt. Nimmt man von sämtlichen Proben der unterschiedlichen Sägen den Mittelwert, so ergibt sich bei allen exakt der gleiche Wassergehalt. Hier war erwartet worden, dass der Einsatz der Bügelsäge zu weniger Wasserverdunstung führen würde, da hierbei die geringste Reibungswärme entsteht. Aufgrund der vorliegenden Daten ist diese Schlussfolgerung jedoch nicht zu treffen, zumal die Reibungswärme bei der elektrischen oder motormechanischen Säge insbesondere auf die abgetrennten Sägespäne wirkt, welche nicht der Probe zugeordnet bleiben. Folglich kann die Wahl der Säge vorrangig nach Gesichtspunkten der Arbeitserleichterung erfolgen, daher kam für die Holzproben hier die Motorsäge sowie die Kreissäge (Abbildung 24) zum Einsatz.



Abbildung 24: Probenahme mit Kreissäge für Wassergehaltsbestimmung

4.5.4.3 Wassergehaltsbestimmung im einzelnen Scheit (Vorversuche)

Zur Bestimmung des Wassergehalts des einzelnen Scheits wurden drei jeweils vier Zentimeter dicke Proben bei den Baumarten Fichte und Buche an den Stellen 0 cm, 50 cm und 90 cm genommen (Abbildung 25). Um festzustellen, mit welcher Gewichtung jede einzelne der drei Probenahmepositionen bei der Mittelwertbildung für den gesamten Scheit eingehen sollte, wurden weitere Vorversuche durchgeführt. Dazu wurden 30 Scheite mit unterschiedlichen Wassergehalten komplett in 25 ca. 4 cm dicke Scheiben gesägt und deren Wassergehalt nach der Trockenschrankmethode bestimmt. Aus diesen Einzelwerten ließ sich jeweils der durchschnittliche Gesamtwassergehalt jedes Scheites errechnen. Nun wurde dieser Durchschnittwert aller Scheiben jeweils mit dem Durchschnittswert verglichen, der sich aus den Wassergehalten der drei in Abbildung 25 dargestellten Probenahmepositionen errechnete. In einer weiteren Anpassung wurde nun bestimmt, mit welchen Gewichtungsfaktoren die drei genannten Teilproben bei der Mittelwertbildung verrechnet werden müssten, damit die Mittelwerte am besten übereinstimmten. Diese Berechnungen erfolgen mittels einer computergestützten Funktion für einen polynomialen Fit. Die gefundenen Gewichtungsfaktoren sind:

- für Position 0 cm: 0,092,
- für Position 50 cm: 0,136,
- für Position 90 cm: 0,773

daraus ergibt sich die nachfolgende Formel für die Berechnung des Wassergehalts eines Scheites aus den drei Teilproben:

$$w_{ges} = 0{,}092\ w_{0cm} + 0{,}136\ w_{50cm} + 0{,}773\ w_{90cm}$$

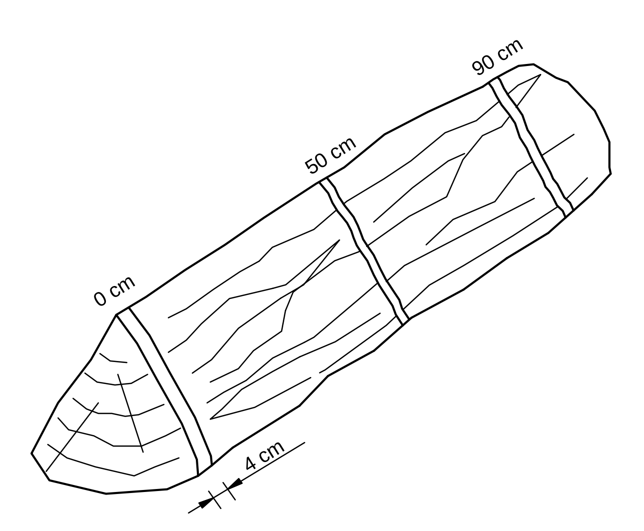


Abbildung 25: Probenahmepositionen für die Wassergehaltsbestimmung am Meterscheit

An diesen Gewichtungsfaktoren fällt auf, dass die Position bei 90 cm sehr hoch gewichtet wird, während die beiden übrigen Messwerte einen geringen Einfluss bei der Mittelwertbildung ausüben. Diese Beobachtung legt die Vermutung nahe, dass sich eine Position im Meterscheit finden lässt, bei welcher der Wassergehalt in der Scheitholzpraxis generell am zuverlässigsten gemessen

werden kann. Anhand der Vielzahl der durchgeführten Holzscheibenversuche lässt sich eine solche optimale Probenahmeposition nur für einen gewissen Bereich erhöhter Wahrscheinlichkeit für den richtigen Wert bestimmen. Dieser ergibt sich aus den Schnittpunkten des Gesamtdurchschnitts mit dem Wassergehaltsverlauf über die Gesamtlänge des Meterscheites (Abbildung 26). Dieser Verlauf ähnelt oft einer quadratischen Funktion, er kann aber in den Extremzuständen (z. B. waldfrisch oder lufttrocken) auch annähernd eine Gerade ergeben.

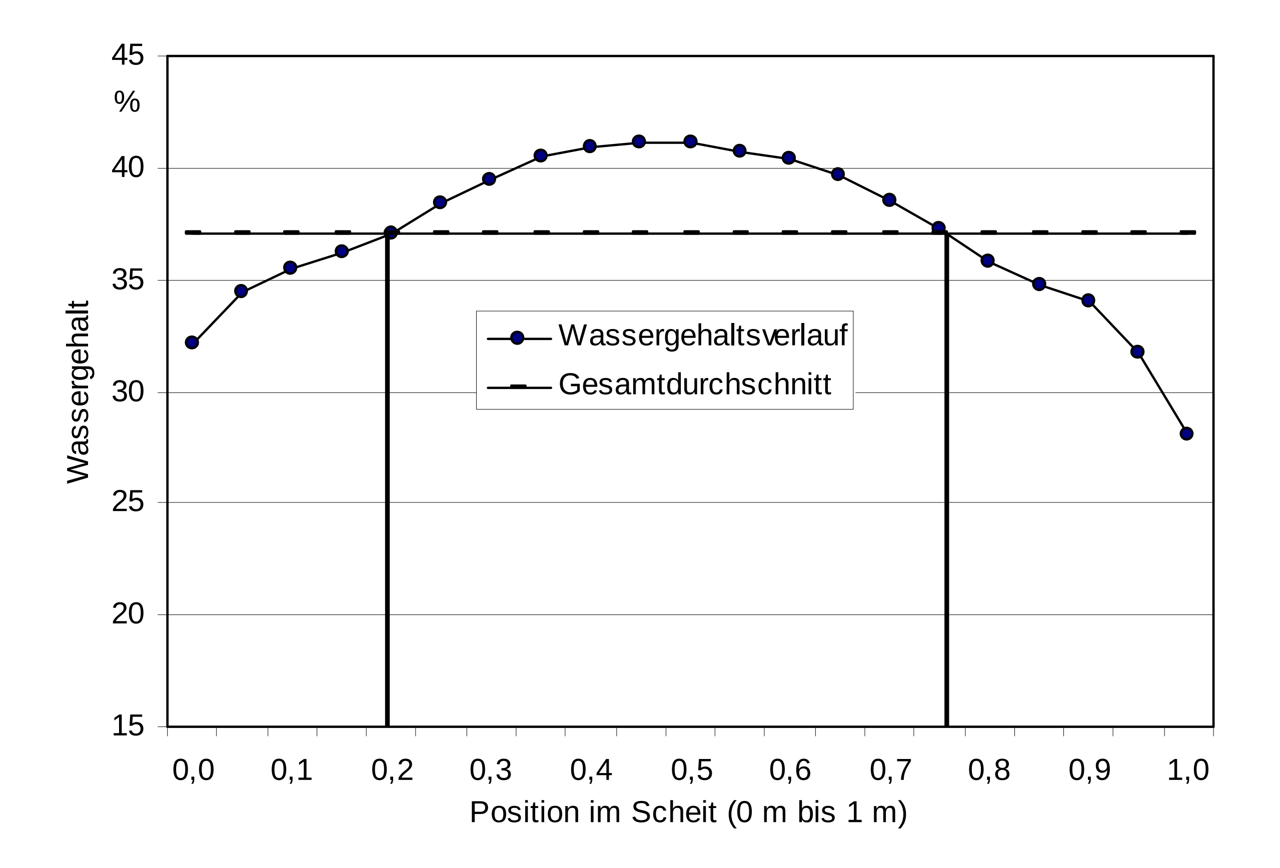


Abbildung 26: Optimale Position für eine einzelne Probenahme zur Wassergehaltsbestimmung in einem Buchen-Meterscheit

In dem in Abbildung 26 dargestellten Beispiel für ein Buchenscheit lagen die optimalen Probenahmepositionen für die Wassergehaltsbestimmung bei 0,24 m bzw. 0,77 m, hier stimmte der Gesamtdurchschnittswassergehalt mit dem Wassergehaltsverlauf im Scheit überein. Eine entsprechende Auswertung für die übrigen 41 in gleicher Weise gemessenen Meterscheite zeigt Abbildung 27. Von der Gesamtzahl der gemessenen Wassergehalte der Probenscheiben sind in dieser Abbildung nur jene dargestellt, die mit dem Gesamtmittelwert übereinstimmen. Die exakten Werte erhält man durch Interpolieren der gemessenen Werte. Die Ergebnisse in Abbildung 27 zeigen, dass eine einzelne Wassergehaltsprobennahme im Bereich um ca. 15 cm (ab der Schnittkante gemessen) eine relativ hohe Aussagefähigkeit für den mittleren Wassergehalt des gesamten Meterscheites bietet. Wenn also nur eine einzige Probe aus einem Scheit genommen werden soll, bietet der Bereich von 11 cm – 20 cm die geringste Fehlerwahrscheinlichkeit. Auch für den Einsatz von Schnellbestimmungsgeräten (z.B. nach dem Leitfähigkeitsprinzip arbeitende Geräte,

vgl.[23]) ist hier ein geeigneter Einstechpunkt für die dabei verwendeten Ramm-Elektroden gegeben. Für eine genauere Messung jedoch bedarf es mehrerer Messstellen mit der richtigen Gewichtung.

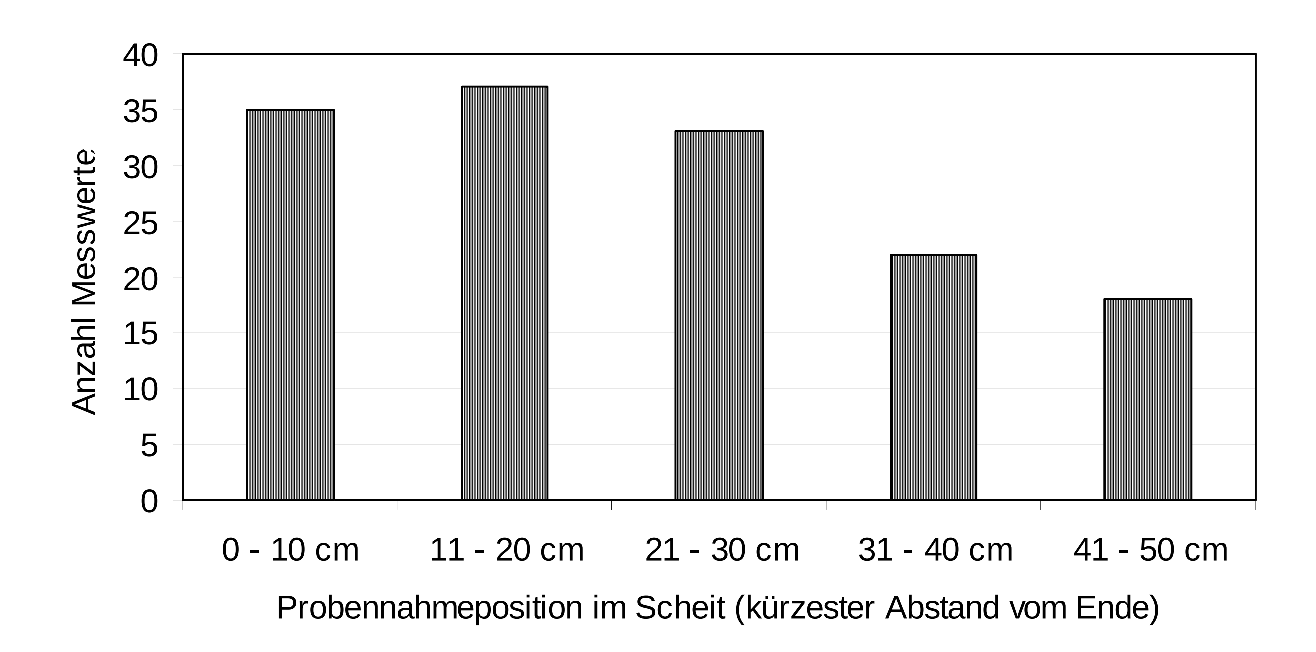


Abbildung 27: Verteilung der Häufigkeit, mit der die optimale Probennahmeposition bei der Wassergehaltsbestimmung in einem bestimmten Abschnitt eines Meterscheits lag (Bereiche in denen die gemessene Wassergehaltsprobe mit dem Gesamtdurchschnitt übereinstimmte)

4.5.4.4 Die wiederkehrende Gewichtsbestimmung

Über die gesamte Lagerdauer wurden die durch Abtrocknung, Wiederbefeuchtung oder Masseverlust eintretendenden Gewichtsänderungen in monatlichem Abstand erfasst. Hierzu wurden die einzelnen nummerierten Bündel bzw. Gitterboxen an einer Wiegezelle aufgehängt und gewogen (Abbildung 29). Dazu wurde eine Flintec DMS Wägezelle, Typ UB6 C3, mit einer Nennlast von 510 kg verwendet. Diese Version entspricht der Eichklasse III bis 3000d Auflösung [18]. Als Anzeigegerät war der DMS-Messverstärker HBM MVD 2510 angeschlossen. Die Ablesegenauigkeit betrug 50 g.

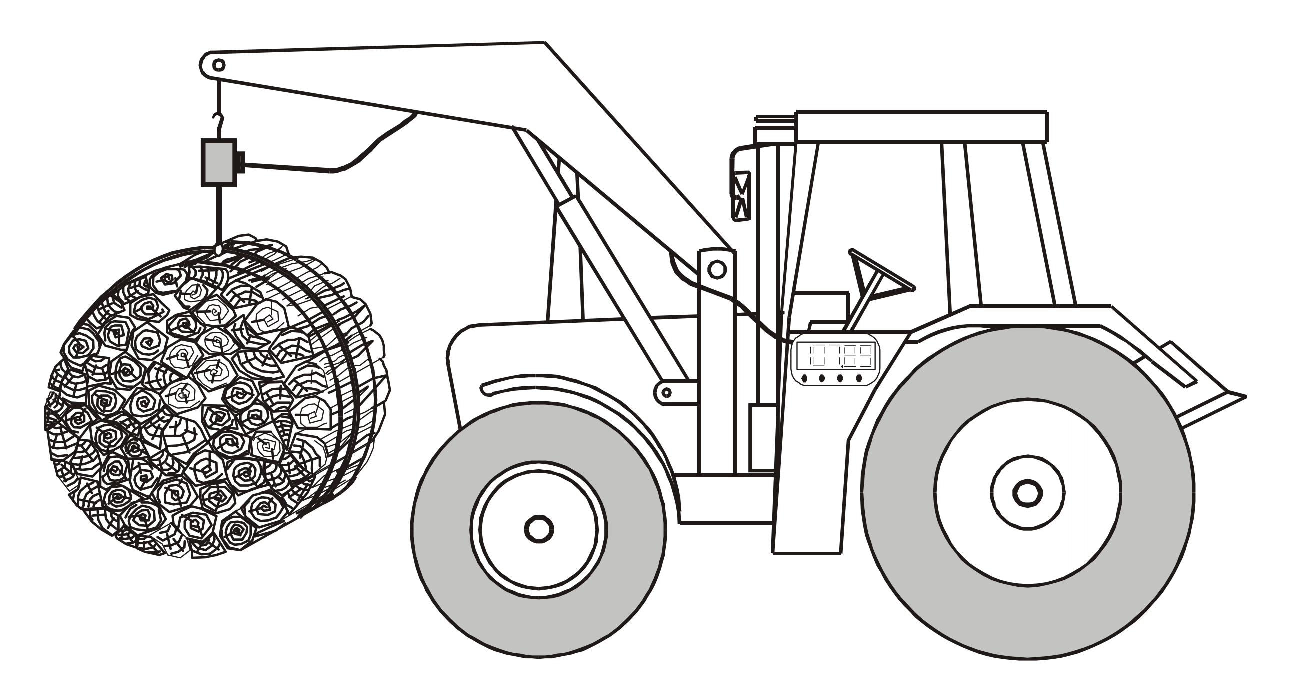


Abbildung 28: Die regelmäßige Wiegung der Meterscheit-Bündel (schematisch)

Vor jedem Messen wurde die Wiegezelle mit einer exakten Last von 280 kg kalibriert. Dieses Vorgehen ermöglichte es, einen Wettereinfluss oder eine Messdrift zu erkennen und gegebenenfalls zu korrigieren. Infolge der großen Empfindlichkeit kam es darauf an, nicht bei größerer Windbewegung zu wiegen, denn dies konnte das Ergebnis verfälschen.

Des weiteren wurden mit Dataloggern (175-H2 der Firma Testo) innen und außen am Lagerplatz in Freising im Abstand von 6 h täglich viermal die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit gemessen. Hierdurch sollten Rückschlüsse auf die unterschiedlichen Bedingungen der Lagerstandorte ermöglicht werden. Zusätzlich wurden die Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes für die Standorte Freising und Kempten erworben. Diese Daten bestanden aus den monatlichen Mittelwerten für Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Sättigungsdefizit und Niederschläge (zu den gemessenen Klimadaten vgl. Kapitel 5.5.3).

4.5.4.5 Parallelmessung des Wassergehalts in einzelnen Scheiten

Zur Erweiterung des Versuchs ab dem zweiten Jahr der Untersuchung wurde neben der Wiegung der Bündel und Gitterboxen jeden Monat jeweils ein Fichten- und ein Buchenscheit komplett in einzelne ca. 4 cm dicke Probestücke gesägt. Diese Stücke wurden markiert, und ihr Wassergehalt wurde nach der Trockenschrankmethode bestimmt. Diese Messungen dienten

- der Feststellung der Wassergehaltsverteilung innerhalb der Scheite (zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren, vgl. Kapitel 4.5.4.3),
- der Bestimmung der optimalen Probenahmeposition im Meterscheit (vgl. Kapitel 4.5.4.3), sowie der
- Feststellung des Wassergehaltsverlaufs der eingelagerten Holzscheite bzw. der Verifikation der Messungen an den Holzbündeln über die einzelnen Monate (vgl. Kapitel 5.5.5).

4.5.4.6 Schlussmessung nach zwei Jahren Lagerdauer

Im November 2004 wurde an beiden Standorten die Lagerung beendet und das Lager aufgelöst. Wie bei der Anfangsmessung kam es hierbei erneut auf eine möglichst genaue Massen- und Wassergehaltsbestimmung an, daher wurde der Messaufwand gegenüber den Zwischenbestimmungen deutlich erhöht. Aus jedem Bündel wurden vier Scheite außen und in der Mitte entnommen (Abbildung 29). Aus diesen vier Scheiten wurden mit der Kreissäge die drei Probenscheiben wie in Kapitel 4.5.4.3 dargestellt entnommen, um den Wassergehalt nach der Trockenschrankmethode zu bestimmen.

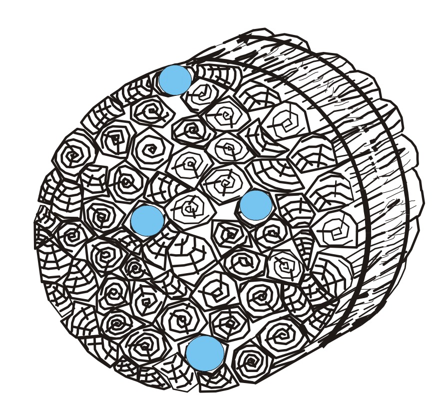


Abbildung 29: Positionen der für Probennahme gewählten Scheite eines Bündels am Lagerende

4.5.4.7 Visuelle Kontrolle

Es wurde versucht, den Rindenverlust zu erfassen. Dafür wurde die Rinde, die sich im Laufe der Trocknung löste oder bei der Wiegung der Bündel verloren ging, eingesammelt und separat gewogen, um sie als eigene Verlustgröße ausweisen zu können. Weiter wurde das Holz auf eine etwaige Verstockung, einen Insektenbefall oder sonstige Auffälligkeiten kontrolliert.

4.5.5 Datenauswertung

Die Wassergehalts- und Massenbestimmungen dienten der Berechnung der Trockenmasseverluste über die gesamte Lagerdauer sowie der Beschreibung des Trocknungsverlaufes. Die Vorgehensweise bei diesen Auswertungen wird im Folgenden beschrieben.

Trockenmasseverluste. Zur Bestimmung der Trockenmasseverluste über die gesamte Lagerdauer wurde die Gesamttrockenmasse jedes Bündels bzw. jeder Gitterbox zu Begin und am Ende der Lagerdauer errechnet und zueinander in Beziehung gesetzt. Zur Feststellung der Anfangstrockenmasse eines Bündels wurde hierzu dessen Frischmassegewicht mit dem mittleren Wassergehalt aller Holzscheite einer Holzart verrechnet. Das heißt, es wurde für jede Holzart ein einheitlicher Anfangswassergehalt angenommen. Diese Annahme beruht auf der Tatsache, dass die Scheite jeder Holzart aus einer einheitlichen Charge mit einheitlichem Erntetermin stammten, homogen vermischt waren und im winterlichen Klima kurzfristig ohne weitere Wassergehaltsverluste direkt nach der Holzernte aufbereitet worden waren. Bei der Endtrockenmasse wurde dagegen zunächst

eine individuelle Trockenmasse für jedes Bündel bzw. jede Gitterbox berechnet, da hier die Wassergehaltsbestimmung gemäß Abbildung 29 den Bündeln direkt zugeordnet werden konnte. Im weiteren Verlauf der Auswertungen erwies es sich jedoch aufgrund der relativ großen Streuung der Einzelmesswerte als sinnvoll, Mittelwerte für mehrere Bündel gleicher Holzart oder sogar holzartenübergreifend zu berechnen.

Der über die Lagerdauer angefallene Rindenverlust war gesondert erfasst und gewogen worden. Die entsprechende Trockenmasse wurde errechnet und als eigene Verlustgröße bezogen auf die eingelagerte Gesamtmasse ausgewiesen.

Wassergehaltsverlauf. Die über die Lagerdauer veränderliche Masse jedes Bündels bzw. jeder Gitterbox spiegelt vor allem den Verlauf der Trocknung bzw. der Wiederbefeuchtung je nach Jahreszeit wider. Während der Versuche war dieser Verlauf zunächst auf Basis der Anfangsmassen und der Anfangswassergehalte aufgezeichnet worden. Bei der Endwassergehaltsbestimmung der Scheite zeigte sich jedoch, dass die Wassergehalte der Einzelmessungen wesentlich besser wiederholbar waren als zu Versuchsbeginn. Das lässt sich am berechneten mittleren relativen Variationskoeffizienten (VK) des Wassergehaltes ablesen, er betrug für die waldfrischen Scheite zu Lagerbeginn durchschnittlich 8,7 % und fiel zum Lagerende bei den relativ homogen abgetrockneten Scheiten im Mittel auf 7,0 % (nicht abgedeckt) und 2,8 % (abgedeckt). Noch größer waren die Unterschiede bei den absoluten Wassergehaltsschwankungen zwischen den Proben, sie waren vor allem bei Lagerende besonders gering.

Die Wassergehalte der Schlussmessung sind somit zuverlässiger als die Anfangswassergehalte einzuschätzen. Somit war es sinnvoll, die Berechnungen der Wassergehalte zu den monatlichen Zwischenwiegungen nachträglich auf die Basis der Endwassergehalte zu beziehen. Bei dieser Vorgehensweise würde allerdings unterstellt, dass Trockenmasseverluste keinen Anteil an den Gewichtsänderungen haben. Da die hierzu durchgeführten Auswertungen jedoch einen eindeutigen – wenn auch geringen – Trockenmassverlust über die zweijährige Lagerdauer ausweisen, wurde eine entsprechende Korrekturrechnung erforderlich. Dazu wurde für alle Holzarten einheitlich je nach Lagerort (Innen/Außen) ein mittlerer Verlust von 2,61 % bzw. 5,66 % unterstellt (vgl. Ergebnisse in Kapitel 5.5.6). Dieser relative Verlust wurde durch die Anzahl der Monate, über die der jeweilige Versuch lief, dividiert; daraus ließ sich nun der jeweilige Korrekturwert für jeden Lagermonat individuell errechnen. Um diesen Korrekturbetrag wurde der Wassergehaltsverlauf nun in Form einer zeitabhängigen Trockenmassegutschrift rückwirkend korrigiert.

5 Ergebnisse der Messungen

5.1 Zeitbedarf bei der Jungdurchforstung (Brennholzernte)

Der Arbeitszeitbedarf für die Brennholzernte wurde in insgesamt 8 Zeitstudien untersucht. Das methodische Vorgehen ist in Kapitel 4.1 ausführlich erläutert. Die Bedingungen, die bei jeder Arbeitsstudie vorlagen, wurden jeweils in Form von Steckbriefen zusammengestellt. Sie können im Anhang 11.1 nachgeschlagen werden (vgl. auch Beispiel in Tabelle 6). Als wichtiges Ergebnis wird unter anderem die technische Arbeitsproduktivität (TAP) ausgewiesen.

In den durchgeführten acht Teilstudien zur Holzernte wurden bewusst unterschiedliche Bestände und Verfahren aufgenommen. Zum einen sollten die jeweiligen Probanden ihr üblicherweise praktiziertes Verfahren anwenden können, zum anderen wurden dadurch aber auch die extrem unterschiedlichen Bedingungen bei der Brennholzbereitstellung im Wald dokumentiert. Der Schwerpunkt der Arbeitsstudien in der Jungdurchforstung lag bei der Baumart Fichte. Zu den acht Teilstudien wurden die vorkommenden Bestände sowie relevante Kenngrößen, Maschinen- und Verfahrensdaten in Form eines Steckbriefes zusammengestellt. Exemplarisch ist ein Steckbrief für die Teilstudie 1 aufgeführt. Alle übrigen Steckbriefe finden sich im Anhang 11.1.

Tabelle 6: Bestandes-Steckbrief: Holzernte Teilstudie 1 mit Fichte. BHD Brusthöhendurchmesser, MDM Mittendurchmesser

Aufnahmedatum	04./05./09.03.2004
	Wuchsbezirk 13.2 "Münchner Schotterebene", Isar-Auwald Raum Freising
Bestandesbeschreibung	Baumarten: 75 % Fichte, 25 % Esche Alter: 25 – 50 Jahre Nutzungs-/Durchforstungsart: Jungdurchforstung (JD)
Kenndaten	Ausscheidender Bestand Mittlerer BHD: 11,22 cm Mittlerer MDM: 8,81 cm Mittleres Rohschaftvolumen: 0,0649 Fm m. R.
Erschließung	Mittlere Entfernung zur Rückegasse: 8,8 m
Behinderungen	Bewuchs: keine Behinderung auf 95 % der Fläche, 5 % mit behinderndem Bewuchs Gelände: keine Behinderung auf 100 % der Fläche Durchschnittliche Hangneigung: 0 % Witterung/Wettereinflüsse: keine Behinderung
Arbeitskräfte	Arbeiter: männlich, 30 Jahre, komplette Schutz- und Arbeitsausrüstung vorhanden
Maschinenausstattung	Motorsäge: Stihl 020
Arbeitsverfahren	Motormanuelle Fällung und Entastung Vermessen mit Hilfe eines Rollmaßbandes Ablängen auf 1-Meter-Stücke, kein Spalten Vorlieferung bis zur Rückegasse, Abholung des Holzes erfolgt zu späterem Zeitpunkt

Die erarbeitete Datengrundlage dient primär der generellen Abschätzung der üblichen Leistungs- und Arbeitszeiten bei der Brennholzernte. In den Teilsstudien 1, 2 und 3 (Fichte) wurde jedoch eine besonders umfangreiche und aussagefähige Datenbasis erarbeitet, so dass diese Studien auch eine weitergehende Auswertung über die Abhängigkeit der Gesamtarbeitszeit und Leistung vom Holzvolumen zulassen; diese Ergebnisse werden nachfolgend ebenfalls dargestellt.



Abbildung 30: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zur Holzernte

5.1.1 Holzernte Teilstudie 1 (Fichte)

Der Proband ist ausgebildeter Forstwirt, der allerdings nicht mehr täglich in der Holzernte tätig ist. Die gesamte Zeitstudie – nach Abzug zweier unvollständiger Datensätze – hatte einen zeitlichen Umfang von 749 Minuten. In dieser Zeit wurden 97 Fichtenstämme zu Brennholz aufgearbeitet. Die größten Zeitanteile (80 %) werden von den Ablaufabschnitten Fällen, Asten/Ablängen und Vorliefern eingenommen (Abbildung 31). Dies gilt unabhängig von den Probanden für alle untersuchten Studien. Die Allgemeinen Zeiten (Rüsten, SVZ, PVZ) nehmen dagegen mit ca. 12 % der gesamten Arbeitszeit in allen Studien einen relativ geringen Wert ein, wobei hier allerdings das Schärfen der Kette fast immer außerhalb der Arbeitsstudie stattfand. Bei der motormanuellen Holzernte wird normalerweise ein Zeitanteil von 20 bis 30 % der Reinen Arbeitszeit (RAZ) als Allgemeine Zeit (AZ) angesetzt.

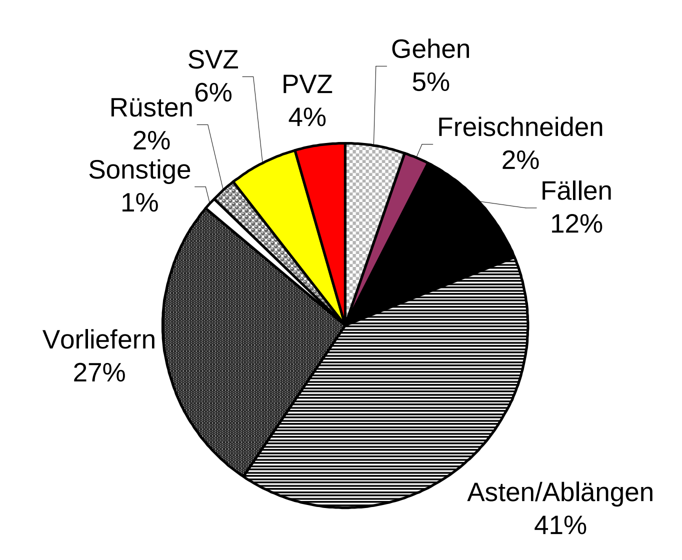


Abbildung 31: Zeitanteile Holzernte Teilstudie 1 (Fichte).
PVZ: persönliche Verteilzeit, SVZ: sachliche Verteilzeit

Aus den aufgearbeiteten 97 Fichten wurde ca. 6,3 Fm m. R. Fichten-Brennholz gewonnen. Die fertigen 1-m-Roller trug der Proband jeweils an die Rückegasse, wobei hier meist mehrere Bäume in einem Arbeitsschritt vorgeliefert wurden (hier insgesamt 11 Arbeitsablaufwiederholungen). Bei den weiteren Auswertungen wurden die Vorlieferzeiten pauschalisiert nach Zeitbedarf je 1-m-Roller den einzelnen Zyklen zugeordnet. Alle Kennwerte zu den gemessenen Arbeitsablaufabschnitten der Teilstudie 1 sind im Anhang 11.1 zusammengestellt.

Üblicherweise ist die Reine Arbeitszeit (RAZ) je Einzelbaum von dessen Volumen abhängig, wobei hierzu eine lineare Abhängigkeit besteht. Diesen Zusammenhang zeigt Abbildung 32. Je größer der zu erntende Baum ist, desto mehr Zeit muss für das Fällen, Asten, Ablängen und Vorliefern aufgewendet werden. Ein entsprechender Zusammenhang ließe sich auch zwischen der Gesamten Arbeitszeit (GAZ) und dem Brusthöhendurchmesser (BHD) bzw. dem Mittendurchmesser (MDM) des Baumes darstellen.

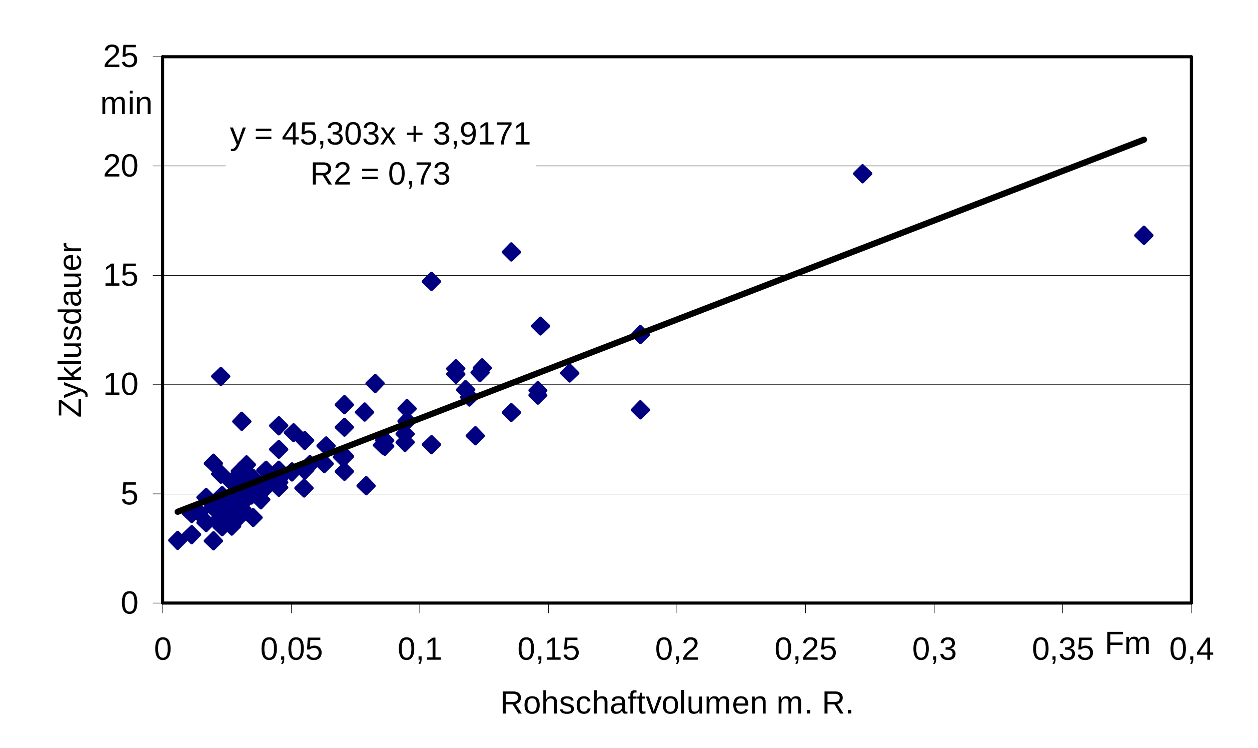


Abbildung 32: Zeitbedarf (RAZ) je Arbeitszyklus Studie 1 in Abhängigkeit vom Rohschaftvolumen

Überträgt man diese lineare Abhängigkeit auf einen Festmeter (oder auch auf einen Raummeter), so zeigt sich, dass hier das so genannte Stückmasse-Gesetz Gültigkeit hat. Die Ausgleichsgerade ergibt eine Hyperbel (Abbildung 33). Um einen Festmeter Fichten-Brennholz aufzuarbeiten, muss bei geringem Einzelbaum-Volumen ein Vielfaches der Zeit aufgewendet werden, welche bei großem Einzelbaum-Volumen erforderlich ist. Bei der forstlichen Holzernte stellt dies eine allgemein bekannte Gesetzmäßigkeit dar, die hier erneut belegt wird.

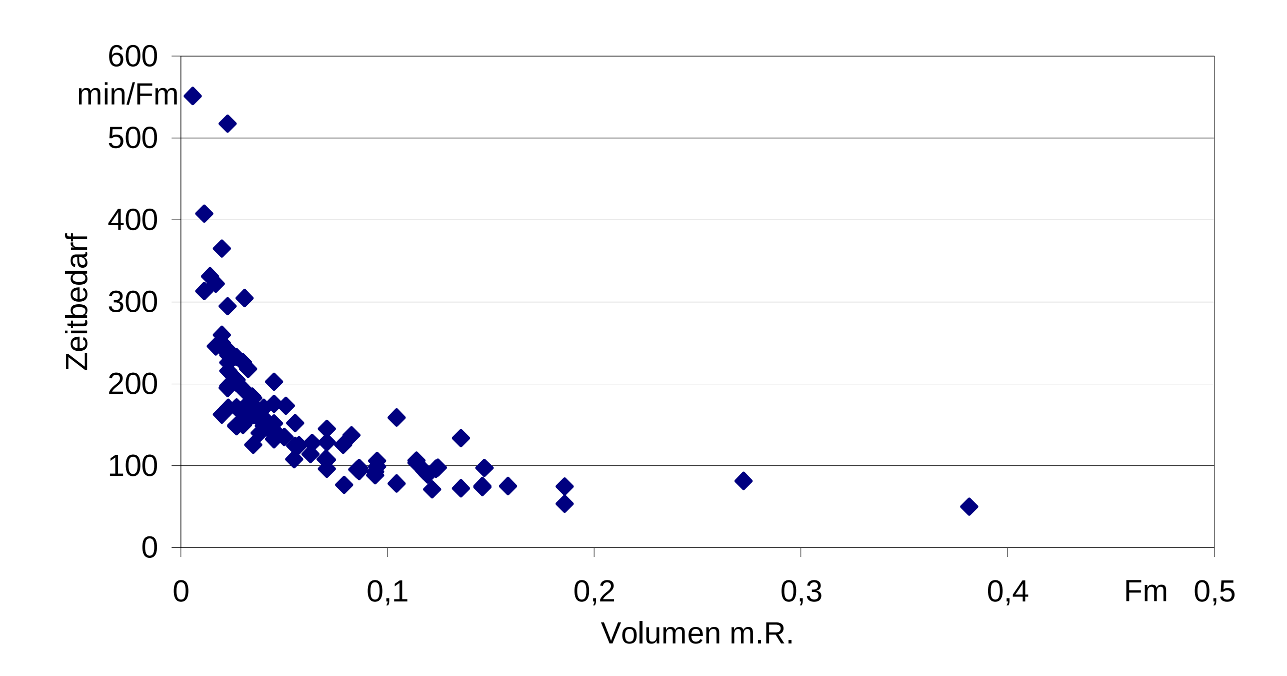


Abbildung 33: Spezifischer Zeitbedarf bei verschiedenen Schaftvolumina (Studie 1, GAZ, Fm). m. R. mit Rinde

Die Arbeitsproduktivität kann auf zwei unterschiedliche Arten berechnet werden. Zum einen wird der arithmetische Mittelwert aus sämtlichen Zyklen einer Studie bestimmt. Die Grundlage bildet dabei die gesamte Arbeitszeit (GAZ), wobei die angefallenen Allgemeinen Zeiten (AZ) prozentual auf alle Zyklen verteilt werden. Zum anderen wird der Quotient aus der gesamten aufgearbeiteten Brennholzmenge und der dafür insgesamt benötigten Arbeitszeit inklusive allgemeiner Zeiten gebildet. Diese Angabe ist deshalb wichtig, weil diese Art der Produktivität auch bei solchen Studien berechnet werden kann, in denen nicht nach einzelnen Zyklen differenziert wurde (z. B. weil eine Erfassung von Teilmengen nicht möglich war). Damit ist eine durchgehende Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. Die Zeitanteile der Ablaufabschnitte zu allen Arbeitsstudien sind in Tabellen im Anhang 11.1 dargestellt.

Bei der Teilstudie 1 betrug die aus den arithmetischen Mittelwerten der Zyklen berechnete technische Arbeitsproduktivität (TAP) für die gesamte Arbeitszeit 0,45 Fm (m. R.) pro Stunde (inkl. AZ-Anteile). Die TAP, die sich aus der gesamten Brennholzmenge und der insgesamt benötigten Arbeitszeit errechnet, betrug 0,5 Fm (m. R.) pro Stunde. Je Studie wurden 1 bis 3 Zyklen nicht ausgewertet, da diese bei der Aufnahme unvollständig waren.

5.1.2 Holzernte Teilstudie 2 (Fichte)

Die Arbeitsweise der beiden Probanden dieser Studie war routiniert. Jeder arbeitete selbstständig im Bestand und bei Bedarf wurde sich gegenseitig ausgeholfen. Dadurch war es möglich, von beiden Personen eine eigene Arbeitsstudie anzufertigen (Teilstudien 2 und 3).

Der geübte Nebenerwerbslandwirt erntete 50 Fichten während eines Beobachtungszeitraumes von 346 Minuten. Die Gliederung der Zeitanteile in Teilstudie 2 ist vergleichbar mit der aus der Teilstudie 1; mit 46 % hat das Asten/Ablängen den größten Zeitanteil, danach folgen die Vorliefer- und Fälltätigkeit (Abbildung 34).

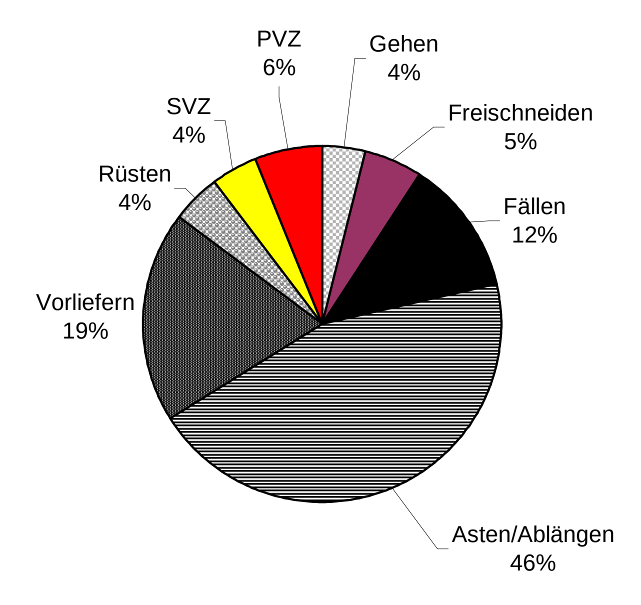


Abbildung 34: Zeitanteile Holzernte Teilstudie 2 (Fichte).
PVZ: persönliche Verteilzeit, SVZ: sachliche Verteilzeit

Bei der Aufarbeitung der 50 Bäume konnten mehrmals Stämme parallel zueinander geastet und abgelängt werden. Dadurch ergeben sich nur 47 Einzelabschnitte mit "Asten/Ablängen". Abgelängt wurde hierbei auf 2-m-Roller. Innerhalb der Gesamtzeit von 346 Minuten wurden ca. 3,91 Fm m. R. Brennholz produziert. Alle Kennwerte zu den gemessenen Arbeitsablaufabschnitten der Teilstudie 2 sind im Anhang 11.1 zusammengestellt.

Auch hier ergibt sich wiederum eine weitgehend lineare Abhängigkeit zwischen dem Zeitbedarf und der Größe des aufgearbeiteten Stammvolumens (Abbildung 35), was die bisherigen Ergebnisse bestätigt.

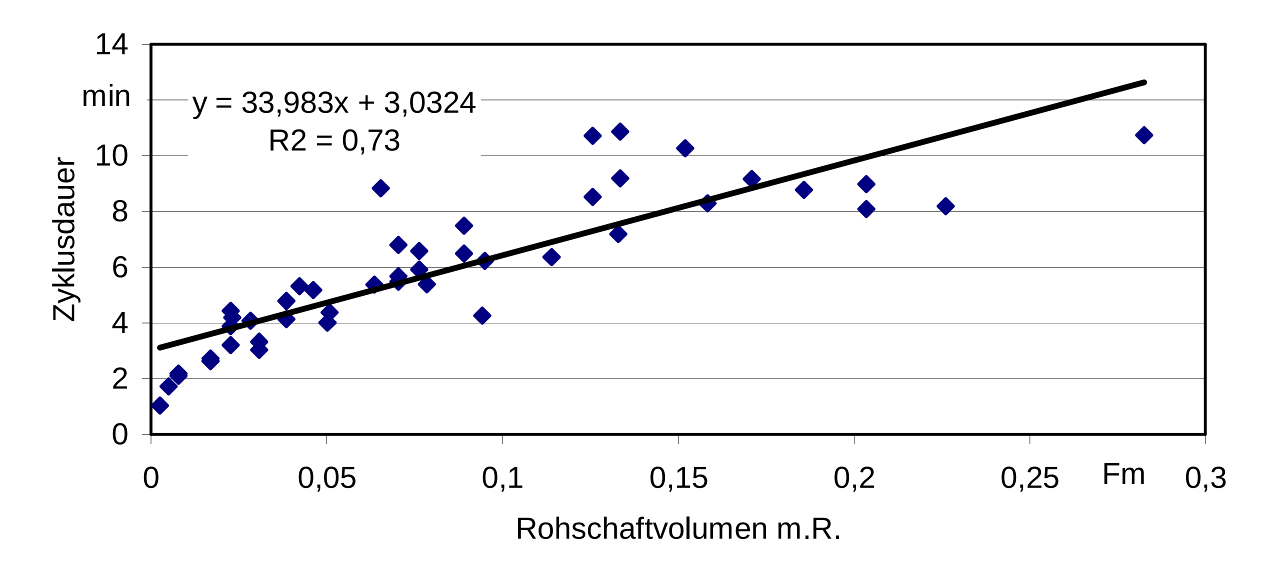


Abbildung 35: Zeitbedarf Studie 2, Reine Arbeitszeit (RAZ) in Abhängigkeit vom Rohschaftvolumen

Der Zeitbedarf für die Aufarbeitung eines Festmeters Brennholz in Abhängigkeit des Schaftvolumens zeigt ebenfalls wieder einen degressiv sinkenden Verlauf (Hyperbel).

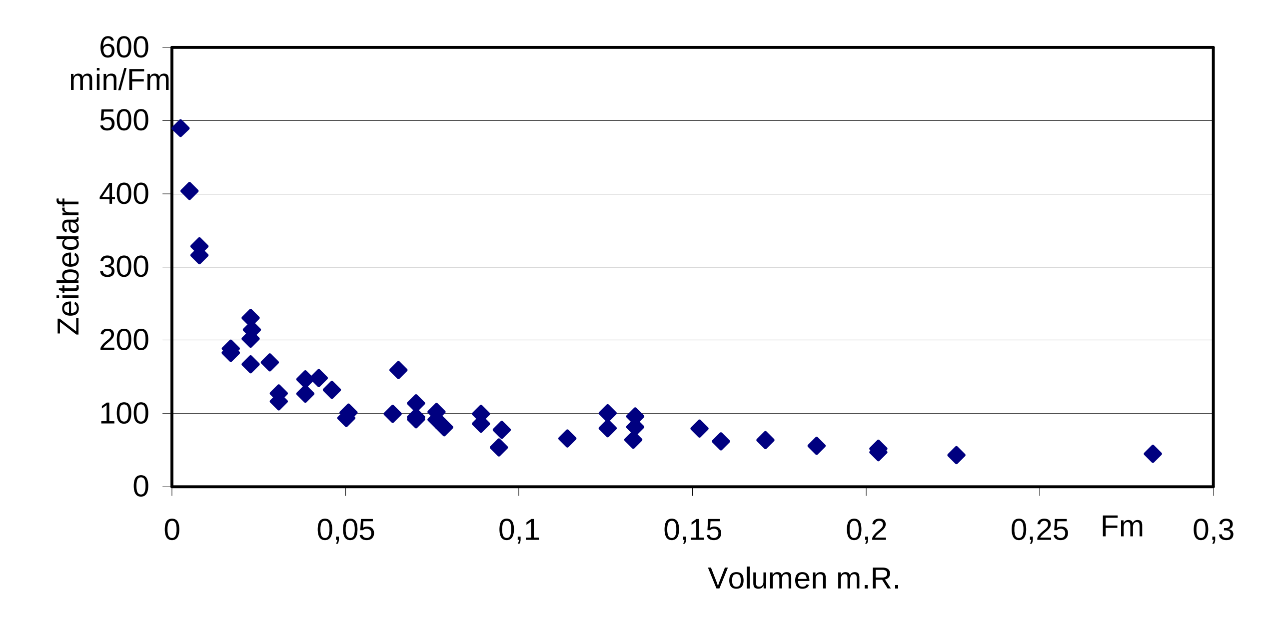


Abbildung 36: Zeitbedarf je Arbeitszyklus Studie 2 (GAZ, Fm m. R.) bei verschiedenen Schaftvolumina

Analog zu den Erläuterungen zu Teilstudie 1 wurde die Produktivität berechnet. In der Teilstudie 2 betrug die aus den arithmetischen Mittelwerten der Zyklen berechnete technische Arbeitsproduktivität (TAP) für die gesamte Arbeitszeit 0,62 Fm (m. R.) pro Arbeitskraftstunde (inkl. AZ-Anteile). Die TAP, die sich aus der gesamten Brennholzmenge und der insgesamt benötigten Arbeitszeit errechnet, betrug 0,68 Fm (m. R.) pro Stunde.

5.1.3 Holzernte Teilstudie 3 (Fichte)

Die Hauptzeitanteile werden wiederum von den Teilarbeiten Fällen, Asten/Ablängen und Vorliefern eingenommen. Die meiste Zeit beanspruchte das Asten und Ablängen der Stämme (Abbildung 37).

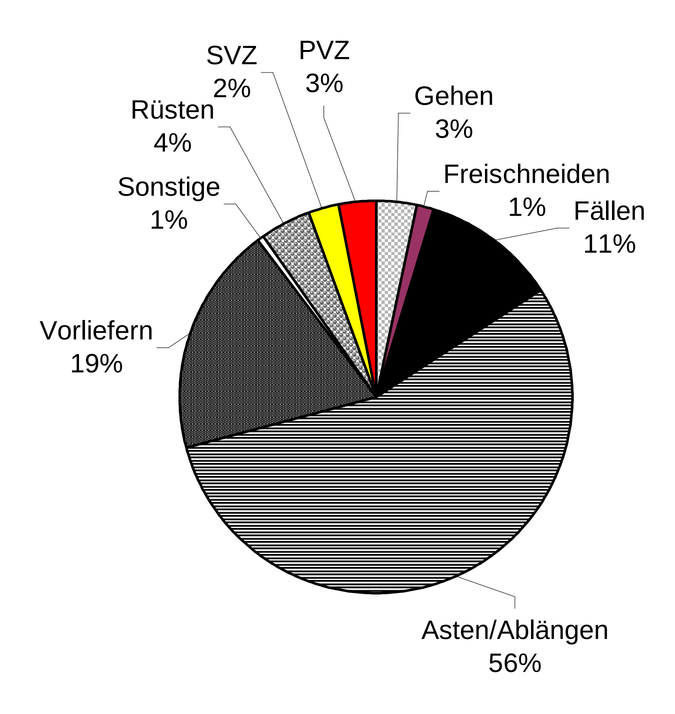


Abbildung 37: Zeitanteile Holzernte Teilstudie 3 (Fichte).
PVZ: persönliche Verteilzeit, SVZ: sachliche Verteilzeit

Die vorliegende Teilstudie 3 dauerte 331 Minuten, es wurden dabei 41 Fichten aufgearbeitet. Während der Arbeitszeit wurden 5,57 Fm m. R. an Brennholz bereit gestellt, wobei auch in diesem Fall immer 2-m-Roller abgelängt und zur Rückegasse getragen wurden. Alle Kennwerte zu den gemessenen Arbeitsablaufabschnitten der Teilstudie 3 sind im Anhang 11.1 zusammengestellt.

Die lineare Abhängigkeit des Zeitbedarfs je Rohschaft vom Schaftvolumen ist auch hier wiederum deutlich erkennbar, wenngleich der Zeitbedarf, wie in Abbildung 38 ersichtlich ist, insgesamt geringer ist als in der Teilstudie 1. Auch der Zeitbedarf für die Aufarbeitung eines Festmeters Brennholz in Abhängigkeit vom Schaftvolumen ergibt wieder den typischen degressiv sinkenden Verlauf, der die Gültigkeit des Stückmasse-Gesetzes aufzeigt (Abbildung 39).

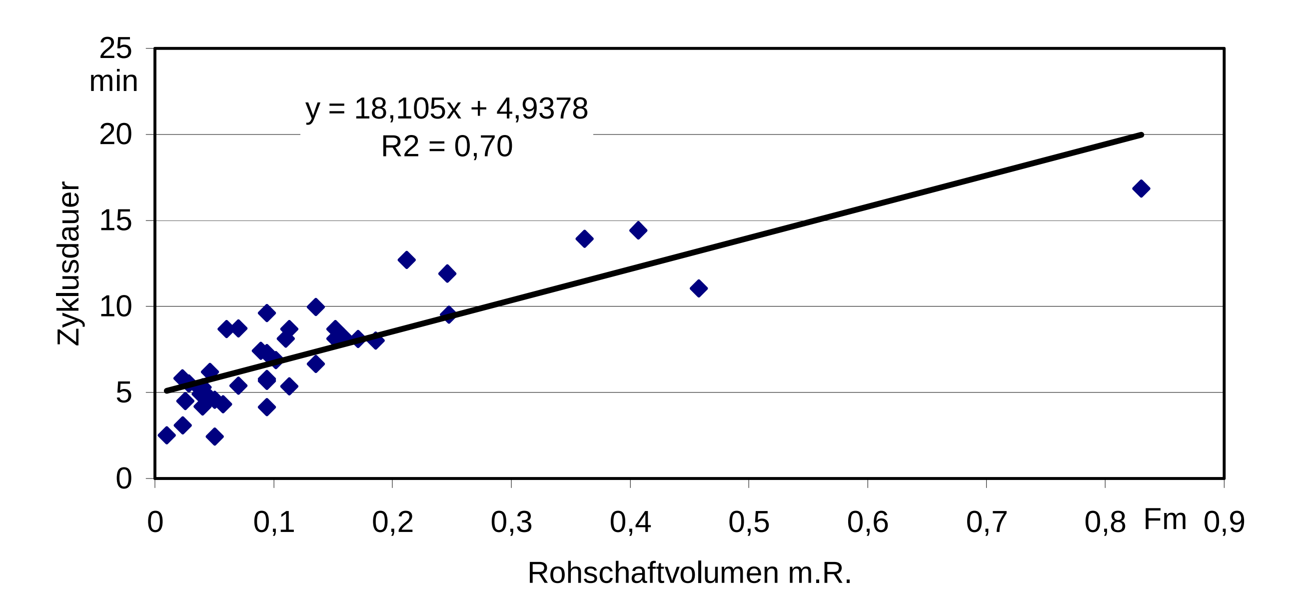


Abbildung 38: Zeitbedarf (RAZ) je Arbeitszyklus Studie 3 in Abhängigkeit des Rohschaftvolumens

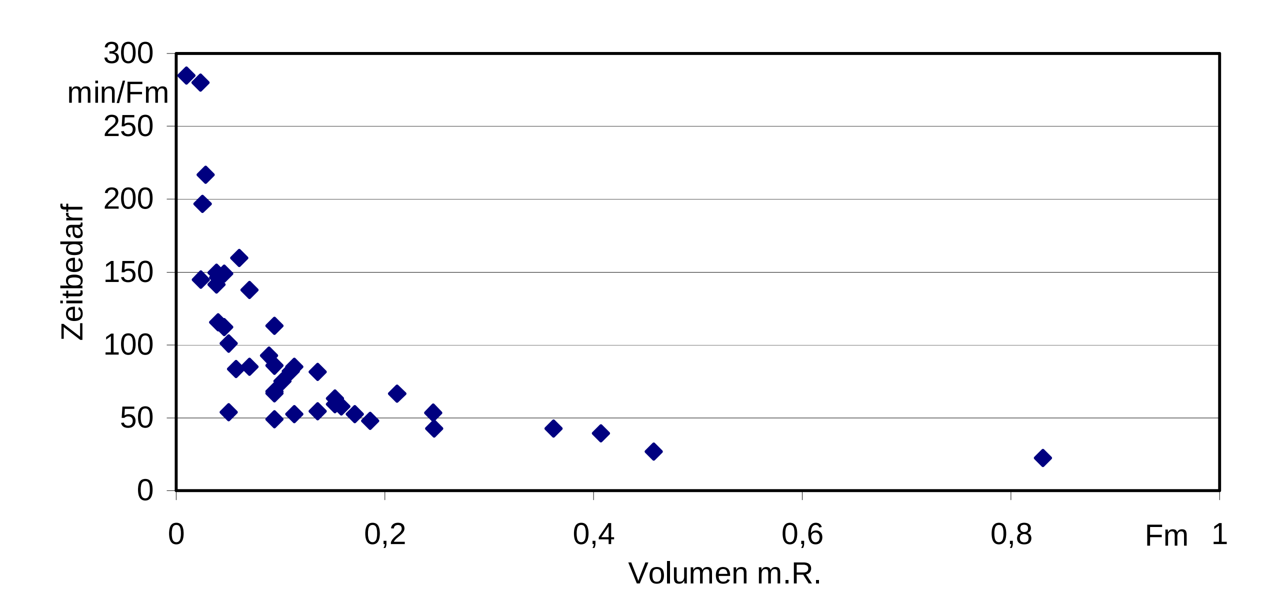


Abbildung 39: Zeitbedarf je Arbeitszyklus Studie 3 (GAZ, Fm m. R.) bei verschiedenen Schaftvolumina

In der Teilstudie 3 betrug die aus den arithmetischen Mittelwerten der Zyklen berechnete technische Arbeitsproduktivität (TAP) für die gesamte Arbeitszeit 0,85 Fm (m. R.) pro Arbeitskraftstunde (inkl. AZ-Anteile). Die TAP, die sich aus der gesamten Brennholzmenge und der insgesamt benötigten Arbeitszeit errechnet, betrug 1,01 Fm (m. R.) pro Stunde (vgl. hierzu auch Erläuterungen zu Teilstudie 1). Die Leistungswerte des Probanden 3 lagen damit deutlich höher als die Leistungen der Teilstudie 1 (ebenfalls Fichte).

5.1.4 Holzernte Teilstudie 4 (Fichte)

Der beobachtete Selbstwerber stellte bis zum Zeitpunkt der Untersuchung nur kleinere Mengen an Brennholz für den Eigenbedarf bereit und war deshalb wenig routiniert. Diese Zeitstudie stellt insgesamt auch die kürzeste Aufnahme der gesamten Untersuchung dar. Differenzierte Betrachtungen sollen hier daher nicht erfolgen, vielmehr kommt es auf die für das Verfahren typische Leistung an.

Besonders auffallend ist der hohe Zeitanteil "Vorliefern" (Abbildung 40). Dies ist dadurch begründet, dass der Proband das Brennholz im Durchschnitt über mindestens 50 m von Hand transportieren musste. Da dem Brennholz-Selbstwerber nur der eigene Pkw mit Anhänger zur Verfügung stand, musste das aufgearbeitete Holz zum nächsten Pkw-befahrbaren Weg gebracht werden. Auch der normalerweise unbedeutende Ablaufabschnitt "Sonstige Zeiten" ist mit 15 % Zeitanteil auffallend hoch. Unter diesem Sammelbegriff werden z. B. Rückfragen, Anweisungen u. ä. summiert, die mit dem Informationsbedürfnis des Probanden an der durchgeführten Studie zusammenhingen. Alle Kennwerte zu den gemessenen Arbeitsablaufabschnitten der Teilstudie 4 sind im Anhang 11.1 zusammengestellt.

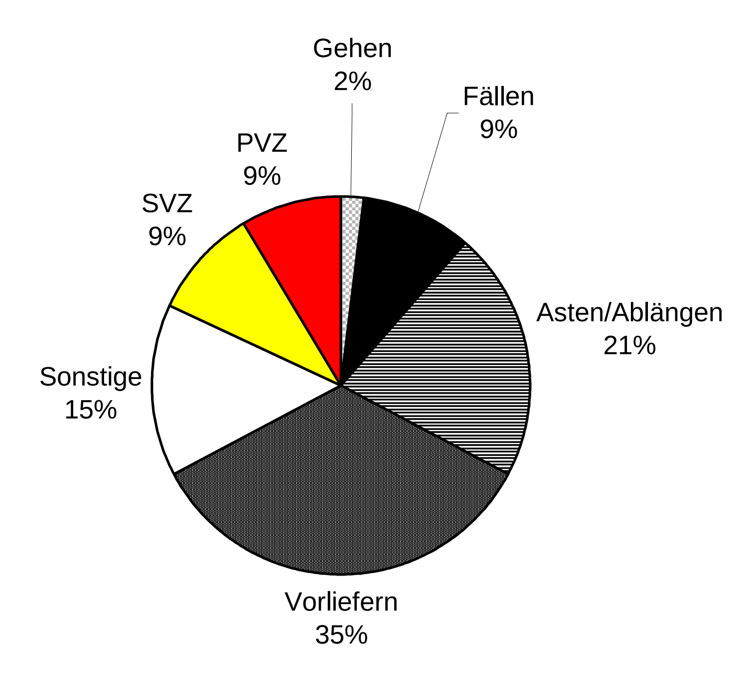


Abbildung 40: Zeitanteile Holzernte Teilstudie 4 (Fichte).
PVZ: persönliche Verteilzeit, SVZ: sachliche Verteilzeit

Die Studie dauerte insgesamt 132 Minuten, es wurden dabei nur 11 Fichten mit einem Volumen von 0,56 Fm m. R. aufgearbeitet und vorgeliefert. Aufgrund der kurzen Aufnahmezeit ist die Aussagekraft eingeschränkt, allerdings sind derartig kurze Einsatzzeiten bei Selbstwerbern nicht unüblich.

In der Teilstudie 4 betrug die aus den arithmetischen Mittelwerten der Zyklen berechnete technische Arbeitsproduktivität (TAP) für die gesamte Arbeitszeit 0,26 Fm (m. R.) pro Arbeitskraftstunde (inkl. AZ-Anteile). Die TAP, die sich aus der gesamten Brennholzmenge und der insgesamt benötigten Arbeitszeit errechnet, betrug 0,25 Fm (m. R.) pro Arbeitskraftstunde (vgl. hierzu auch Erläuterungen zu Teilstudie 1).

5.1.5 Holzernte Teilstudie 5 (Kiefer)

Der Proband war langjähriger Brennholz-Selbstwerber am damals noch bestehenden Forstamt Freising. Während der Aufnahme wurde er von einem Bekannten bei den Teilarbeiten "Ablängen" und "Vorliefern" unterstützt. Es wurde lediglich vom Hauptakteur eine Zeitstudie angefertigt. Die Arbeitszeit seines Helfers ging aber in die Leistungsberechnung mit ein. Anders als bei den vorherigen Zeitverteilungen wird hier ein neuer Teilabschnitt "Seilarbeit" eingeführt, während der Abschnitt "Vorliefern" fehlt (Abbildung 41). Dies hängt vor allem mit dem angewandten Verfahren zusammen. Der Helfer übernahm in erste Linie die Vorliefertätigkeit der 1-m-Stücke zum Fahrzeug. Unter Zuhilfenahme einer eingebauten Kleinseilwinde, die am Geländewagen des Selbstwerbers befestigt war, war es möglich, Bäume zu Boden zu ziehen, die aufgrund von Schlinggewächsen im Bestand festgehalten wurden. Diese Tätigkeiten werden unter dem Begriff "Seilarbeit" aufgeführt.

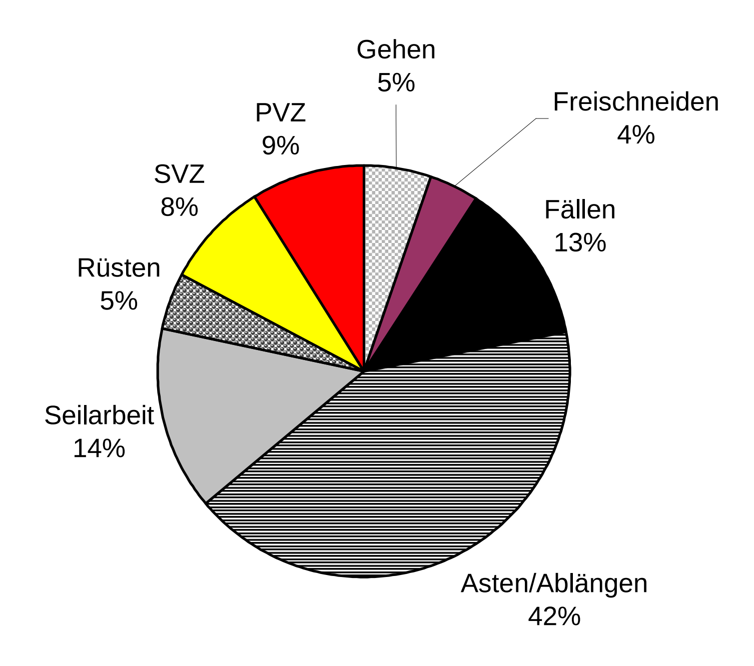


Abbildung 41: Zeitanteile Holzernte Teilstudie 5 (Kiefer).
PVZ: persönliche Verteilzeit, SVZ: sachliche Verteilzeit

Der Beobachtungszeitraum betrug 135 Minuten. In diesem Zeitraum, für den bei 2 Personen die doppelte Arbeitszeit anzusetzen war, wurden 18 Kiefern mit insgesamt 0,79 Fm m. R. Brennholz

aufgearbeitet. Alle Kennwerte zu den gemessenen Arbeitsablaufabschnitten der Teilstudie 5 sind im Anhang 11.1 zusammengestellt.

In der Teilsstudie 5 betrug die aus den arithmetischen Mittelwerten der Zyklen berechnete technische Arbeitsproduktivität (TAP) für die gesamte Arbeitszeit 0,15 Fm (m. R.) pro Arbeitskraftstunde (inkl. AZ-Anteile). Die TAP, die sich aus der gesamten Brennholzmenge und der insgesamt benötigten Arbeitszeit errechnet, betrug 0,18 Fm (m. R.) pro Arbeitskraftstunde (vgl. hierzu auch Erläuterungen zu Teilstudie 1).

5.1.6 Holzernte Teilstudie 6 (Kiefer)

Die beobachtete Familie war im Wechsel mit vier Personen im Einsatz, wobei zumeist drei Personen tatsächlich im Wald arbeiteten. Neben zwei männlichen Arbeitskräften (Alter 40 und 65 Jahre) war auch ständig eine ältere Frau (75 Jahre) beim Asten (Axt), Vorliefern und Laden beteiligt. Von den männlichen Arbeitskräften wurden Zeitstudien angefertigt. Da sich die Arbeiter an keinen zyklischen Arbeitsablauf hielten, konnte keine zyklische Auswertung erfolgen. Als neuen Ablaufabschnitt wurde die Tätigkeit "Laden" aufgenommen, da parallel zur Aufarbeitung auch das Beladen des Brennholzes auf einen Anhänger stattfand (Abbildung 42).

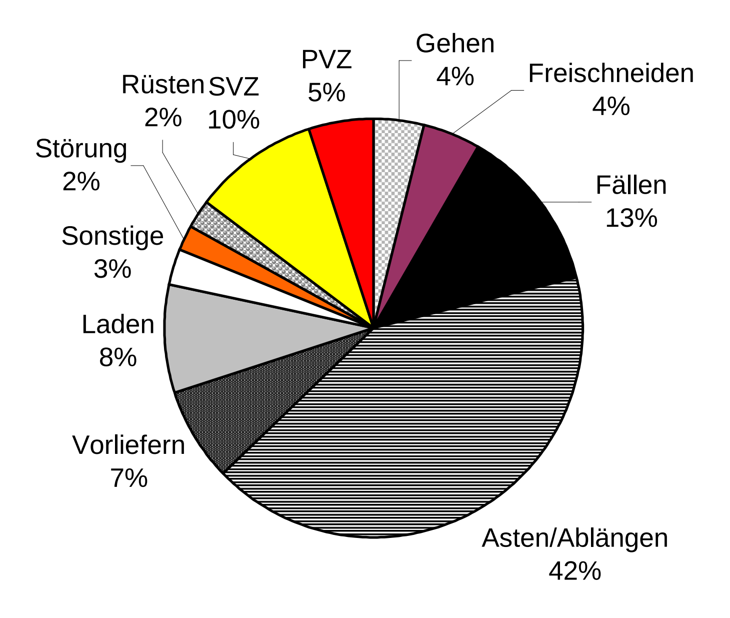


Abbildung 42: Zeitanteile Studie 6 (Kiefer) PVZ: persönliche Verteilzeit, SVZ: sachliche Verteilzeit

Die aufgeführte Gesamtzeit setzt sich aus den zwei Einzelzeiten der aufgezeichneten Arbeiter zusammen. Die beiden Motorsägenführer arbeiteten teilweise zusammen, gemeinsam wurden 72 Kiefern geerntet und zu 1,75 Fm m. R. aufgearbeitet. Alle Kennwerte zu den gemessenen Arbeitsablaufabschnitten der Teilstudie 6 sind im Anhang 11.1 zusammengestellt.

Im Gegensatz zu den vorgenannten Arbeitsstudien konnte die Produktivität aufgrund des speziellen Aufarbeitungsverfahrens nur als Quotient aus Gesamtmenge und Gesamtarbeitszeit berechnet werden. Die dafür zugrunde gelegte Gesamtarbeitszeit setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Arbeitszeit der beiden in der Arbeitsstudie begleiteten Motorsägenführer, jedoch ohne Ladezeiten,
- 50 % der Arbeitszeit (gutachterliche Schätzung) der 75-jährigen Probandin, da diese einen Hauptteil der Zeit beim Laden verbrachte,
- 60 Minuten des dritten Motorsägenführers, der nur vorübergehend an der Aufarbeitung beteiligt war.

Die daraus resultierende technische Arbeitsproduktivität (TAP) lag mit 0,18 Fm (m. R.) pro Arbeitskraftstunde auf dem gleichen Niveau wie in der Teilstudie 5. Beide Studien wurden zwar im gleichen Kiefernbestand durchgeführt, jedoch waren die Einzelvolumina in Teilstudie 6 noch deutlich geringer. Auch hier kam es zu Behinderungen aufgrund von Schlingpflanzen (Waldrebe, Wilder Hopfen), die oftmals den Fall der Bäume behinderten.

5.1.7 Holzernte Teilstudie 7 (Ahorn, Buche)

Diese Aufnahme fand im Bereich des Oberpfälzer Juras statt. Da innerhalb des Bestandes eine Teilfläche eine starke Steigung aufwies, wurden von den zwei Arbeitern zunächst nur Rohschäfte aufgearbeitet. Diese sollten dann zu einem späteren Zeitpunkt mit Seilwinde beigezogen und anschließend an der Forststraße abgelängt werden. Als Endprodukte der vorgestellten Teilstudie sind somit Rohschäfte im Bestand sowie aufgearbeitete, an die Rückegasse vorgelieferte Kronenteile zu nennen. Die Gesamtarbeitszeit betrug 487 min; während dieser Zeit wurden von den zwei Arbeitern 23 Stämme mit 4,77 Fm m. R. aufgearbeitet.

Das Vorliefern bezieht sich in erster Linie auf die vollständig aufgearbeiteten Kronen. Der Abschnitt "Freischneiden" beinhaltet zusätzlich noch das Konzentrieren der schwächeren Kronenäste auf einen Haufen, deshalb wird dafür – im Gegensatz zu den Studien in den Nadelwäldern – ein beachtlicher Zeitanteil benötigt (Abbildung 43).

Alle Kennwerte zu den gemessenen Arbeitsablaufabschnitten der Teilsstudie 7 sind im Anhang 11.1 zusammengestellt. Die Gesamtzeit der Studie erstreckte sich über zwei Arbeitstage.

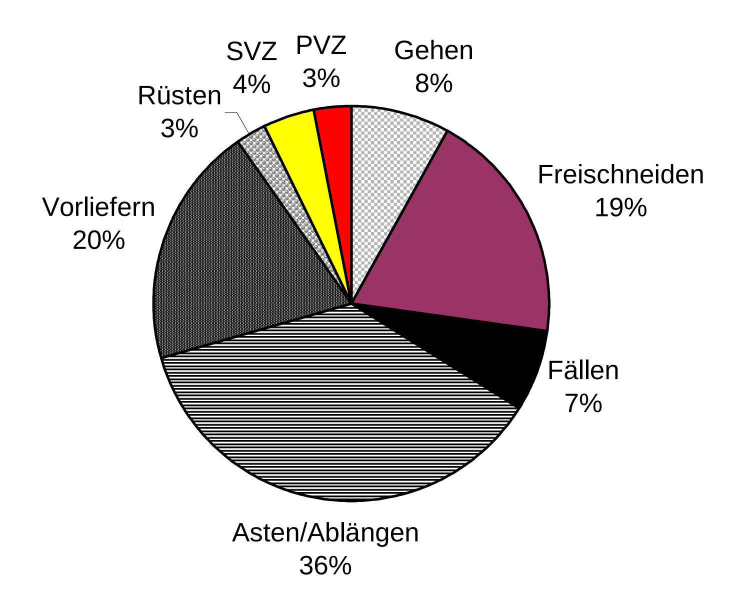


Abbildung 43: Zeitanteile Holzernte Teilstudie 7 (Ahorn, Buche).
PVZ: persönliche Verteilzeit, SVZ: sachliche Verteilzeit

Obwohl für die Zeitanteilsbestimmung nur eine Zeitstudie erstellt wurde (nur ein Arbeiter wurde beobachtet), konnte in der Leistungsberechnung die Arbeitszeit beider Personen berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich eine technische Arbeitsproduktivität (TAP) von 0,29 Fm (m. R.) pro Arbeitskraftstunde.

5.1.8 Holzernte Teilstudie 8 (Esche)

Die bereits in den Teilstudien 2 und 3 genannten Probanden wurden ein weiteres Mal untersucht. Doch anstatt junger Fichten wurden diesmal stärkere Eschen gefällt. Bei dieser Teilstudie wurde von beiden Personen Zeitstudien angelegt. Die Auswertungen wurden zusammengefasst und entsprechend dargestellt. (Abbildung 44)

Für das Abziehen hängen gebliebener Bäume bzw. das Beiziehen der Rohschäfte zur nächsten Rückegasse wurde wieder eine Seilwinde eingesetzt.

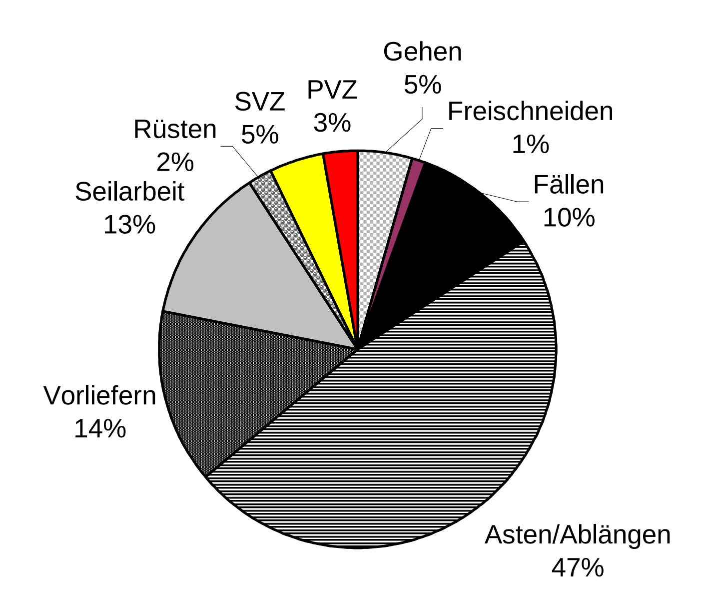


Abbildung 44: Zeitanteile Holzernte Teilstudie 8 (Esche).
PVZ: persönliche Verteilzeit, SVZ: sachliche Verteilzeit

Insgesamt wurden 17 Eschen gefällt. Diese hatten ein Rohschaftvolumen von 7,4 Fm m. R. (das zusätzlich aufgearbeitete Kronenmaterial mit ca. 10 % des Rohschaftvolumens wurde nicht berücksichtigt). Für die vollständige Brennholzaufarbeitung (ohne Spalten) wurden von beiden Arbeitern insgesamt 314 Minuten benötigt. Alle Kennwerte zu den gemessenen Arbeitsablaufabschnitten der Teilstudie 8 sind im Anhang 11.1 zusammengestellt.

In der Teilstudie 8 betrug die aus den arithmetischen Mittelwerten der Zyklen berechnete technische Arbeitsproduktivität (TAP) für die gesamte Arbeitszeit 1,49 Fm (m. R.) pro Arbeitskraftstunde (inkl. AZ-Anteile). Die TAP, die sich aus der gesamten Brennholzmenge und der insgesamt benötigten Arbeitszeit errechnet, betrug 1,42 Fm (m. R.) pro Arbeitskraftstunde (vgl. hierzu auch Erläuterungen zu Teilstudie 1). Damit ist die hier erreichte Leistung unter allen durchgeführten Studien am höchsten, wobei der Hauptgrund in den hohen Stückmassen der geernteten Eschen zu suchen ist.

5.1.9 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Holzernte

Die beschriebenen Brennholz-Bereitstellungsverfahren der Holzernte variieren teilweise deutlich in den Arbeitsabläufen. Meist sind keine einheitlichen Standardverfahren vorhanden. Diese Tatsache ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Die jeweils eingesetzte Ausrüstung ist ein ebenso wichtiges Kriterium wie die durch den jeweiligen Waldbestand vorgegebenen Voraussetzungen (siehe Steckbriefe in Anhang 11.1). Schließlich spielen auch die individuellen Vorlieben der Selbstwerber hinsichtlich des Verfahrens eine wichtige Rolle.

Eine differenzierte Darstellung der Leistungs- und Arbeitszeitbedarfswerte bei verschiedensten Ausgangsbedingungen (Stück-Masse, Bestand, Gelände, Erschließung, Ausrüstung, Fertigkeiten,

Leistungsfähigkeit) erscheint aus den hier vorgestellten stichprobenhaften Untersuchungen nicht möglich. Dennoch soll im Folgenden versucht werden, Kennzahlen und Empfehlungen für die Praxis aus den hier gewonnenen Ergebnissen und Erfahrungen abzuleiten und darzustellen.

Abbildung 45 fasst in einer Übersicht die starke Variation der Leistungswerte bei den durchgeführten Arbeitsstudien zusammen. Dabei zeigt sich, dass die Produktivität (TAP gesamt) je nach Arbeitsbedingungen zwischen 0,18 und 1,42 Fm/AKh variiert. Entsprechend breit können damit auch die Arbeitskosten für die Brennholzernte im Wald streuen, obgleich die bei den geringen Leistungen vermutlich niedriger anzusetzenden Lohnkosten hier eine gewisse Kompensation herbeiführen können.

Auch hinsichtlich der untersuchten Aufarbeitungsformen der beschriebenen Holzernteverfahren ist eine gewisse Uneinheitlichkeit festzustellen, denn in der Regel handelte es sich bei den erzeugten "Endprodukten" um Brennholz-Roller mit unterschiedlichen Längen (1 m, 2 m oder 2,5 m Länge), die abfuhrbereit an der Waldstraße abgelegt worden waren. In der Teilstudie 7 (Ahorn, Buche) wurden die Rohschäfte nicht abgelängt und vorgeliefert. Damit ist die Vergleichbarkeit der Produktivitätsangaben leicht eingeschränkt.

Die in Abbildung 45 dargestellten Säulen geben die Produktivität der jeweiligen Gesamtstudie (TAP gesamt) wieder, die Klammern stellen den Leistungsbereich der Probanden bei zyklusweiser Auswertung dar. Der Durchschnitt gebildet aus allen Teilstudien für die TAP ergibt einen Wert von 0,56 Fm m.R. pro Arbeitskraftstunde (AKh).

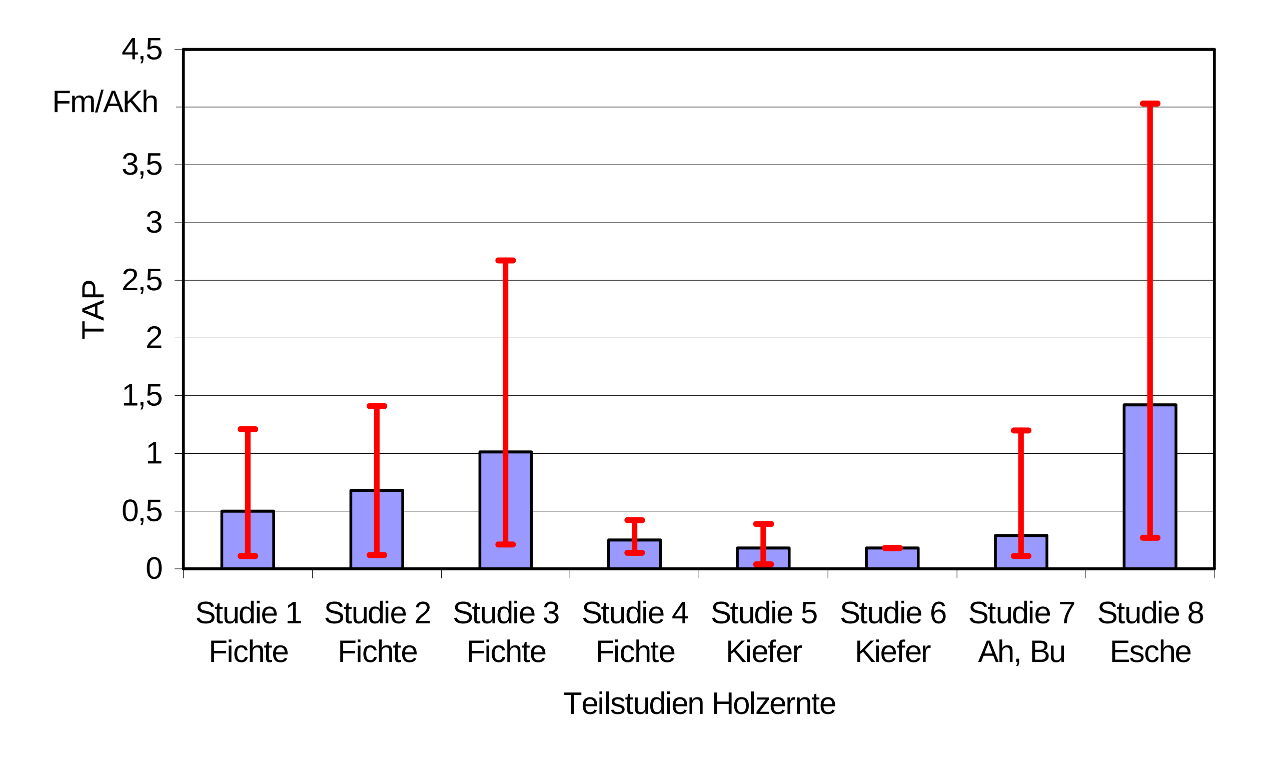


Abbildung 45: Zusammenstellung der Ergebnisse der gemessenen technischen Arbeitsproduktivität aller durchgeführten Arbeitsstudien. Ah Ahorn, Bu Buche

5.1.10 Ableitung von Planungszahlen für die Holzernte

Die in Abbildung 45 gezeigte Schwankungsbreite erschwert die Festlegung praxisgerechter Zeitbedarfswerte. Eine Orientierung und Einordnung könnte aber der jahrzehntelang benutzte und bewährte Holzerntetarif EST (Erweiterter Sortentarif) bieten. Die dort angegebenen Vorgabewerte lassen sich ebenfalls als Kalkulationswerte für den Zeitbedarf verwenden [32]. Aus diesem Grund werden nachfolgend die drei umfangreichsten Arbeitsstudien (Teilstudien 1 bis 3) der vorliegenden Holzernteuntersuchung mit den Vorgabezeiten des EST verglichen, um daraus allgemeingültige Planungszahlen abzuleiten. Dazu wurde eine Umrechnung der in den Arbeitsstudien ermittelten Zeitbedarfsdaten je Festmeter auf die Bezugsgröße Raummeter (Rm) erforderlich. Es ist hierzu der (nach gesetzlicher Handelsklassensortierung HKS) einheitliche Umrechnungsfaktor von 1,25 angesetzt (1 Fm = 1,25 Rm), da zum Zeitpunkt der EST Einführung 1979 keine anderen Umrechnungsfaktoren bekannt waren. Mit Blick auf diese uneinheitliche Vorgehensweise sind die nachfolgend vorgestellten Vergleichsrechungen entsprechend vorsichtig zu interpretieren.

Tabelle 7: Übersicht der Zeitgrade bei den Teilstudien zur Holzernte

Teilstudien	Zeitgrad[a] bei Faktor 1,25	Zeitgrad bei Faktor 1,55
Teilstudie 1	158 %	196 %
Teilstudie 2	202 %	250 %
Teilstudie 3	212 %	263 %

[a] Zeitgrad: Vergleich der tatsächlich benötigten Zeit mit der Vorgabezeit des EST

Die Tabelle 7 bzw. Tabelle 8 zeigt die anhand der Vorgabezeiten des Erweiterten Sortentarifs (EST) errechneten Zeitbedarfswerte in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Brennholz-Roller; es wurden keine besonderen Hiebsmerkmale berücksichtigt (Zu-/Abschläge nach Tab. A oder B des EST für standorts-, bestands- und baumbezogene Hiebsmerkmale). Die Summenwerte werden in der folgenden Abbildung 46 graphisch dargestellt und mit den tatsächlichen Zeitbedarfswerten verglichen. Die Regressionen wurden mit Hilfe der statistischen Auswertungssoftware SAS errechnet.

Tabelle 8: EST-Berechnung Fichte Schichtholz unter Arbeitsbedingungen (Rollenlänge, Vorlieferentfernung) der Teilstudie 1

Mittlerer Rollendurchmesser in cm	Aufarbeitung[a] Zeitbedarf in min/Rm m.R.	Vorliefern[b] Zeitbedarf in min/Rm m.R.	Ablegen[c] Zeitbedarf in min/Rm m.R.	Zeitbedarf Summe in min/Rm m.R.
10	103	36	6	145
11	83	33	6	122
12	73	30	6	109
13	66	28	6	100
14	60	26	6	92
15	56	25	6	87
16	53	23	6	82
17	51	22	6	79
18	49	21	6	76
19	47	20	6	73
20	45	19	6	70
21	43	18	6	67
22	41	18	6	65
23	39	17	6	62
24	37	17	6	60
25	35	16	6	57

[a] nach Vorgabetabelle 27 des EST
[b] nach Vorgabetabelle 34 des EST
[a] nach Vorgabetabelle 40 des EST

Die errechneten Ausgleichs-Hyperbeln haben einen ähnlichen Verlauf (Abbildung 46), der tatsächliche hier gemessene Zeitbedarf liegt deutlich unter den EST-Vorgaben (Zeitgrad 100 %). Die Vorgabezeiten beginnen beim EST erst ab einem Mittendurchmesser (MDM) von 10 cm; um jedoch eine Vergleichbarkeit der Werte herzustellen, wurden die EST-Zeiten bis zu einem Mittendurchmesser von 6 cm extrapoliert.

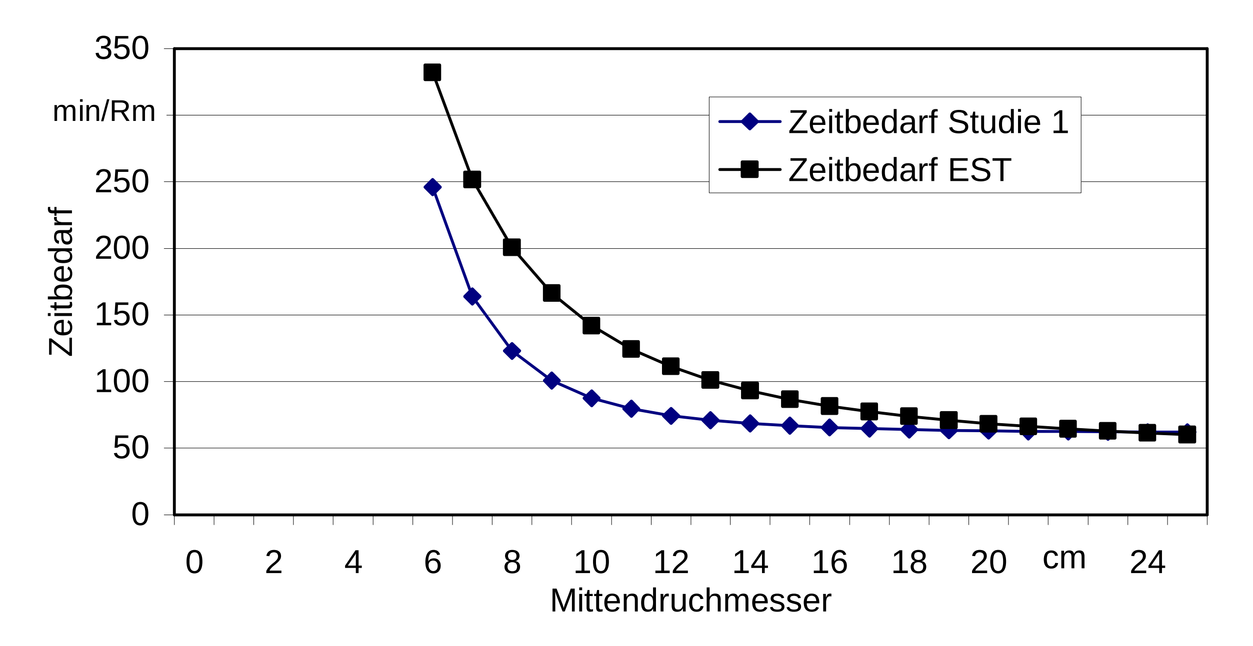


Abbildung 46: Tatsächlicher Zeitbedarf nach Teilstudie 1 und EST-Zeitbedarf

Tabelle 9: EST-Berechnung Fichte Schichtholz unter Arbeitsbedingungen der Teilstudien 2 und 3

Mittlerer Rollendurchmesser in cm	Aufarbeitung[a] Zeitbedarf in min/Rm m.R.	Vorliefern[b] Zeitbedarf in min/Rm m.R.	Ablegen[c] Zeitbedarf in min/Rm m.R.	Zeitbedarf Summe in min/Rm m.R.
10	92	32	6	130
11	77	29	6	112
12	65	27	6	98
13	59	25	6	90
14	55	24	6	85
15	51	22	6	79
16	49	21	6	76
17	47	20	6	73
18	45	19	6	70
19	43	18	6	67
20	41	17	6	64
21	39	17	6	62
22	37	16	6	59
23	35	15	6	56
24	33	15	6	54
25	31	14	6	51

[a] nach Vorgabetabelle 27 des EST
[b] nach Vorgabetabelle 34 des EST
[a] nach Vorgabetabelle 40 des EST

Im Gegensatz zur Teilstudie 1 wurden bei den Teilstudien 2 und 3 jeweils 2-m-Roller aufbereitet; zudem war die Vorlieferentfernung etwas größer. Auch hier ergibt sich ein ähnlicher Hyperbel-Verlauf. Die beiden Probanden benötigten jedoch deutlich weniger Zeit, als im Erweiterten Sortentarif angegeben wurde (Abbildung 47).

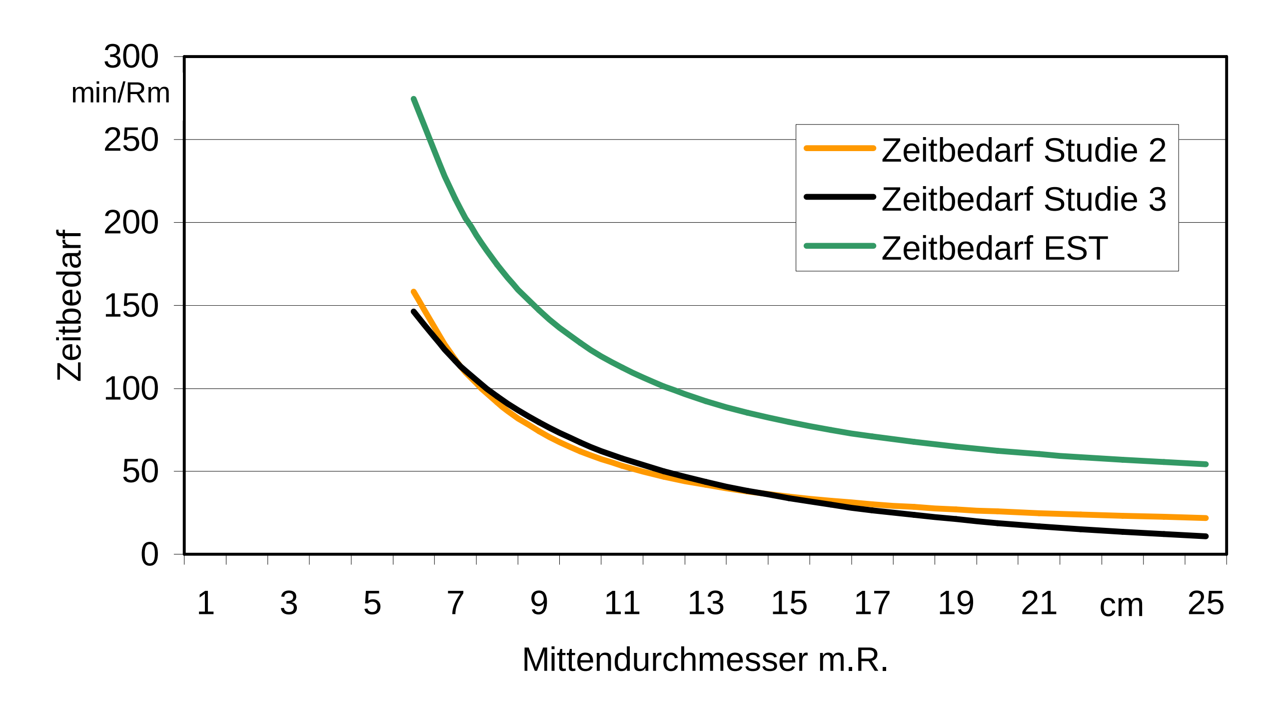


Abbildung 47: Tatsächlicher Zeitbedarf und EST-Zeitbedarf, Teilstudien 2 und 3

Aus dem Vergleich der tatsächlich benötigte Zeit mit der Vorgabezeit des EST ergibt sich der Zeitgrad in Prozent. Für die festgelegten Vorgabezeiten gilt der Zeitgrad 100 %[1]. Im Laufe der Zeit wurden von den professionellen Waldarbeitern immer höhere Zeitgrade erreicht, d. h. die Arbeiter waren in der Regel schneller mit der jeweiligen Tätigkeit fertig, als dies der Erweiterte Sortentarif (EST) eigentlich vorgab. Mittlerweise wird für Zeitbedarfskalkulationen bei Waldarbeitern vom Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik (KWF) ein Zeitgrad von 150 % angesetzt (mittleres Zeitgradniveau Tarifgebiet West 158 %, Ost 148 %). JACKE [32] setzt bei seinen Zeitbedarfskalkulationen den Zeitgrad mit 160 % an.

In der Teilstudie 1 erreicht der Proband einen Zeitgrad von ca. 158 %, die Probanden der Teilstudien 2 und 3 lagen im Bereich von 200 %. Die Ursachen für diesen hohen Zeitgrad können verschiedenartig sein. Der Hauptgrund dürfte in der sehr hohen Motivation und Leistungsbereitschaft der Probanden aus den Teilstudien 2 und 3 liegen. Zudem waren sie augenscheinlich gut eingespielt und sind aufgrund ihrer häufigen Brennholzaufarbeitung (Brennholzhändler!) hinsichtlich

[1] Berechnung des Zeitgrades: **Vorgabezeit/tatsächlich benötigte Zeit = Zeitgrad (in %)**
Beispiel: olumina beziehen sich auf 1 Fm), Rollendurchmesser 12 cm, Vorgabezeit ca. 100 min
Beispielrechnung: a) tatsächliche Zeitbedarf 120 min, Zeitgrad 83 %
b) tatsächlicher Zeitbedarf 80 min, Zeitgrad 125 %

Verfahren, Ausrüstung und dem Übungsgrad als professionell zu bezeichnen. Außerdem ist noch zu beachten, dass sie die beschriebenen Arbeiten nicht täglich, sondern maximal 2 bis 3 Tage pro Woche in der Winterperiode durchführten.

Zeitbedarfsmodell-Fichte

Der Verlauf der errechneten Hyperbeln spiegelt, wie bereits erläutert, das Stückmasse-Gesetz wieder. Die graphisch dargestellten Abweichungen zu den vorgegebenen EST-Zeitbedarfswerten können als Parallelverschiebungen, die das Leistungsniveau des einzelnen Arbeiters charakterisieren, beschrieben werden.

Um praxisnahe Planungszahlen und Anhaltswerte für die Brennholzaufarbeitung im Wald zu erhalten, wird nachfolgend für einfache Fichten-Bestandsverhältnisse eine EST-Modellkalkulation durchgeführt.

Die Vorgaben für den Bestand sind:

- Fichten-Jungdurchforstung bzw. Altdurchforstung ohne besondere Behinderungsmerkmale hinsichtlich Hangneigung, Gelände/Bewuchs sowie aufgrund von extremen Witterungsverhältnissen (Eis oder Schnee)
- Keine Besonderheiten hinsichtlich Formigkeit der Bäume (d. h. mittelschäftig) sowie anderer Baummerkmale (z. B. astige Traufbäume)

Bezüglich des Verfahrens werden folgende Vorgaben festgelegt:

- Motormanuelle Aufarbeitung der gesamten Rohschäfte von Fichten bzw. Tannen zu 1-m-Rollern, dabei wird ein eventuell notwendiges Spalten nicht berücksichtigt.
- Händisches Vorliefern der Brennholz-Roller von einer Strecke zwischen 11 bis 15 m sowie ein geordnetes Ablegen an der Waldstraße als sogenannte Rauhbeige.
- Einsatz geeigneter funktionsfähiger Werkzeuge und Motorsägen. Der Einsatz eines Rollmaßbandes wäre sinnvoll.

Zusätzlich beinhaltet dieses Modell drei Leistungsniveaus für die Arbeiter:

- Leistungsniveau 1 : 160 % Zeitgrad entspricht dem Leistungsvermögen eines ausgebildeten, gut geübten und konditionell trainierten Forstwirtes mit professioneller Ausrüstung (gemäß Literaturabgaben [32] bzw. Mittelwerte der Zeitgrade bei der Teilstudie 1 und den Teilstudien 2 bzw. 3)
- Leistungsniveau 2 : 100 % Zeitgrad entspricht genau der EST-Vorgabe, die in der Vergangenheit für ausgebildete Forstwirte als normal angesehen wurde. Entspricht heute einem geübten und fachkundigen Waldarbeiter, z. B. einem öfters im Wald tätigen Landwirt
- Leistungsniveau 3 : 60 % Zeitgrad entspricht hier per Definition einem Arbeiter mit geringer Übung bei der Waldarbeit, der relativ selten mit einer Hobby-Ausrüstung im Wald arbeitet.

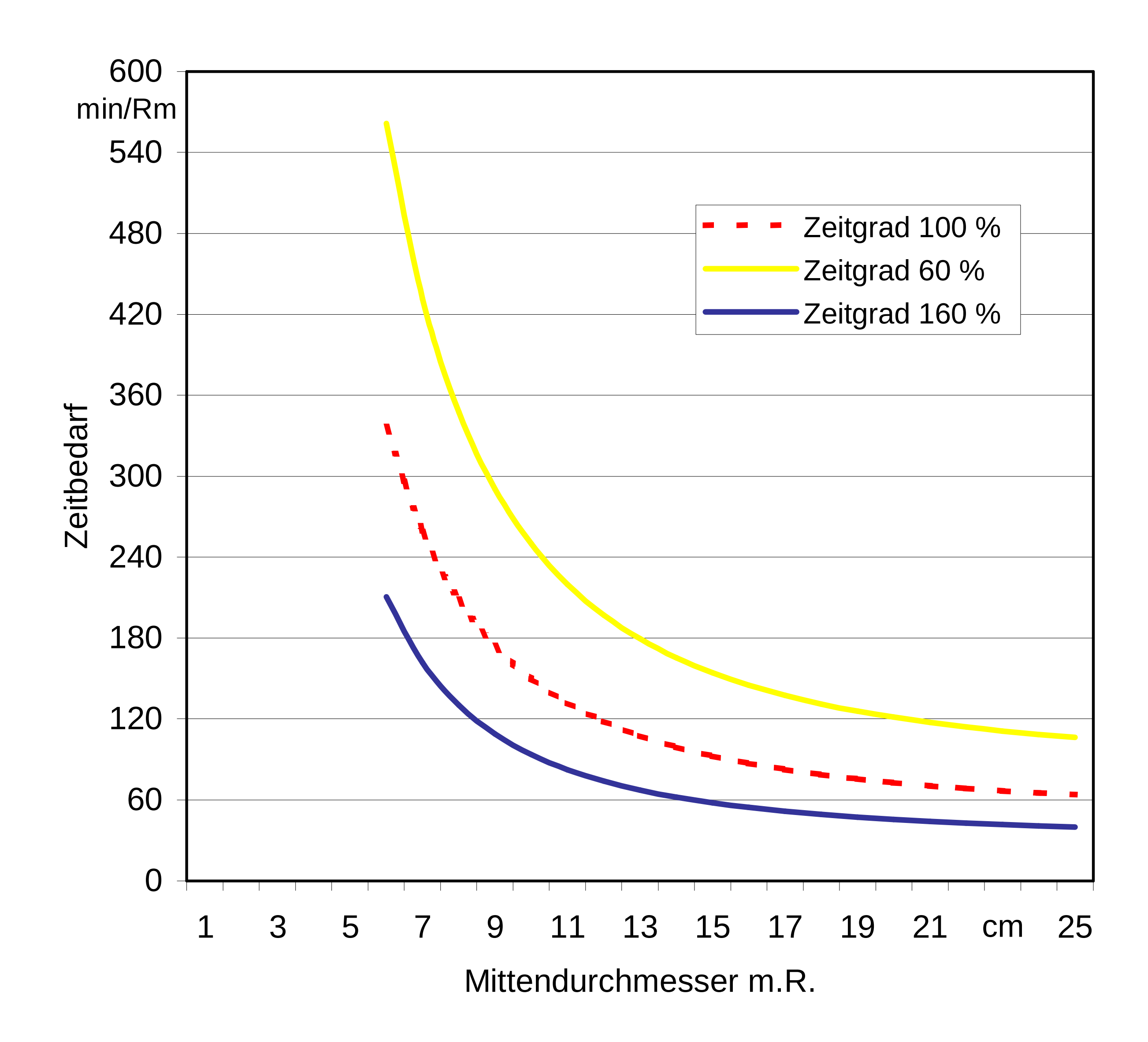


Abbildung 48: Planungsdaten für den Zeitbedarf bei der Fichten-Brennholzernte (1-m-Roller, Rauhbeige), gemäß EST-Modell

Für die dargestellten Bedingungen lässt sich das in Abbildung 48 gezeigte Zeitbedarfsmodell berechnen. Es kann in der Praxis wie folgt eingesetzt werden:

Der Brennholzwerber stellt fest, welchen mittleren Rollendurchmesser die von ihm aufzuarbeitenden Brennholz-Roller (Fichte) haben. Der Einfachheit halber kann überschlägig der mittlere Mittendurchmesser der ausscheidenden Bäume ermittelt werden. Dazu muss beim stehenden Bestand beim BHD ein Abzug in Abhängigkeit von der Abholzigkeit getätigt werden. Für den so ermittelten mittleren Mittendurchmesser kann anschließend in Abbildung 48 der Zeitbedarf abgelesen werden. Allerdings sollte dabei das eigene Leistungsvermögen realistisch eingeschätzt werden. Sinnvoll ist es hierbei, vom Zeitgrad 100 % auszugehen (gestrichelte Linie). Bei häufiger Waldarbeit mit professioneller Forstausrüstung und bei regelmäßiger Aufarbeitung größerer Brennholzmengen liegt der erwartende Zeitbedarf zwischen der unteren und der durchgezogenen Linie. Wird die Waldarbeit dagegen nur als Hobby mit jährlich nur geringen Brennholzmengen

betrieben, so ist der erforderliche Zeitbedarf eher zwischen der durchgezogenen und der oberen Linie abzulesen. Treten im Bestand Besonderheiten auf (z. B. schlechte Erschließung mit deutlich längeren Vorlieferstrecken, starkes Gefälle mit eingeschränkter Begehbarkeit), so müssen Zeitzuschläge eingerechnet werden.

5.2 Zeitbedarf bei der Brennholzaufbereitung

Der Arbeitszeitbedarf für die Brennholzbereitstellung wurde in insgesamt 32 Zeitstudien untersucht. Das methodische Vorgehen ist in Kapitel 4.1 ausführlich erläutert. Die Bedingungen, die bei jeder Arbeitsstudie vorlagen, wurden jeweils in Form eines Steckbriefes zusammengestellt, sie können im Anhang 11.1 nachgelesen werden. Als wichtiges Ergebnis wird unter anderem die technische Arbeitsproduktivität (TAP) ausgewiesen. Hierbei sind zwei Bezugsgrößen möglich, die Maschinenarbeitsstunde und die Arbeitskraftstunde. In der Abkürzung wird für "Stunde" – entsprechend dem geltenden Sprachgebrauch – uneinheitlich einmal "S" und einmal "h" verwendet, so dass die Maschinenarbeitsstunde mit "MAS" und die Arbeitskraftstunde mit "AKh" bezeichnet werden. Beide Produktivitätsangaben sind auch als "Leistungskennzahlen" zu verstehen. Im Fall der auf den Maschineneinsatz bezogenen Produktivität wird von der Maschinendurchsatzleistung gesprochen.

5.2.1 Spalten mit der Axt oder dem Spalthammer

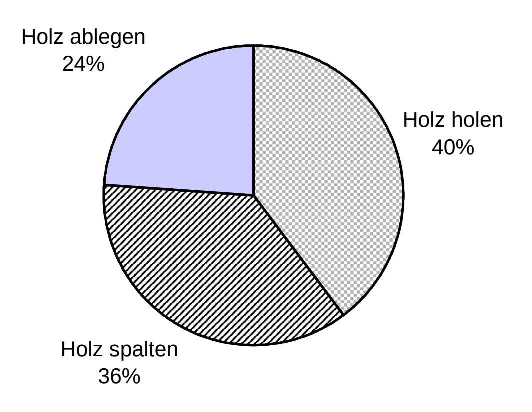
Für das Spalten mit der Axt oder dem Spalthammer wird nur eine einzelne Arbeitskraft benötigt. Bei den hier beobachteten Probanden handelte es sich um einen jungen Landwirt, der regelmäßig Holz mit der Axt spaltet und daher als geübt gelten kann (Axtspalten) bzw. um einen jungen Diplom Forstwirt, der unregelmäßig Holz spaltet aber dennoch als ein sehr leistungsfähiger Proband einzustufen ist (Spalthammer). Die Rahmenbedingungen zu den Teilstudien sind in Anhang 11.1 in Steckbriefform zusammengestellt.

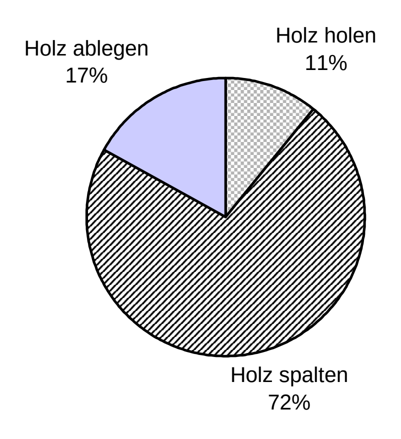
Die Zeitnahme erstreckte sich über eine Gesamtzeitspanne von fünf Stunden (Axtspalten) bzw. drei Stunden (Spalthammer). Dabei lag die maximale Länge des zu spaltenden Holzstücks bei 33 cm. Die zu spaltenden Sortimente bestanden zum einen aus Rundlingen der Holzarten Buche und Fichte, die auf die gewünschte Größe gespalten wurden (Teilstudien SP 1 und SP 2) und zum anderen in grob gespaltenen Fichtenscheiten, die noch weiter zerkleinert werden sollen (Studie AX 1). Diese groben Scheite entstehen beispielsweise beim Spalten mit dem großen Senkrechtspalter, nachdem die entstandenen Meterscheite auf 33 cm abgelängt wurden. Die zusätzliche Spaltzerkleinerung ist für Öfen mit einem besonders kleinen Brennraum wie z. B. Heizungsherde oder kleine Einzelöfen erforderlich.



Abbildung 49: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit Spalthammer

An der Verteilung der einzelnen Arbeitsablaufabschnitte lässt sich ablesen, in wie weit der Arbeitsplatzes optimal gestaltet war. Je mehr Zeit auf das eigentliche Spalten verwendet wird, desto näher liegt das Holzlager und es wird relativ wenig Zeit mit unnötigen Scheittransporten zwischen Spaltplatz und Lager verbracht. Abbildung 50 zeigt, dass der Arbeitsplatz beim Spalten mit dem Spalthammer (SP 1 und 2) demnach wegen des hohen Zeitanteils für "Holz spalten" (durchschnittlich 76 % der Gesamtzeit (GAZ)) günstiger gestaltet war als beim Spalten mit der Axt (AX1: 36 % der GAZ).





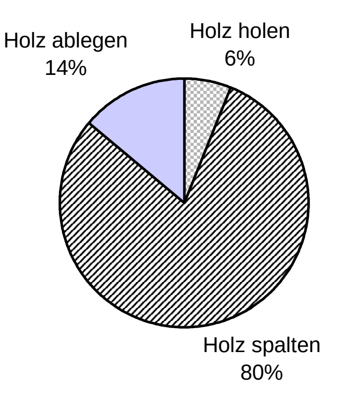


Abbildung 50: Die zeitliche Verteilung der Arbeitablaufabschnitte der Teilstudien zum Axtspalten (AX 1) und zum Spalten mit Spalthammer (SP 1 und 2)

Beim Spalten mit der Axt (AX 1) wurden drei Arbeitsblöcke von je einer Stunde untersucht; sie waren jeweils durch eine Stunde Pause unterbrochen. Die durchschnittlichen Zeiten der einzelnen Ablaufabschnitte für "Holz spalten" zeigen – wie in Abbildung 51 dargestellt – zunächst einen Trainingseffekt, d. h. sie werden im zweiten Arbeitsblock zunächst etwas besser. Danach setzt aber offenbar im dritten Arbeitsblock eine Ermüdung ein. Allerdings deutet der deutlich erhöhte Wert für das "Holz holen" auch auf die nun größere Entfernung des gelagerten Holzes zum Hackstock hin.

Die für das Axtspalten gemessene durchschnittliche Spaltleistung (Produktivität) lag bei der Holzart Fichte bei 1,3 Schüttraummetern pro Stunde (SRm/AKh). Da der Ermüdungseffekt trotz einstündiger Pausen bereits nach zwei Stunden eintrat, ist davon auszugehen, dass diese Leistung nur über eine kurze Zeit und bei relativ kleinen Holzvorräten tatsächlich erzielt werden kann. Die Ermüdung und die gemessene Leistung zeigen, dass sich das Verfahren für eine professionelle Scheitholzbereitstellung nicht eignet.

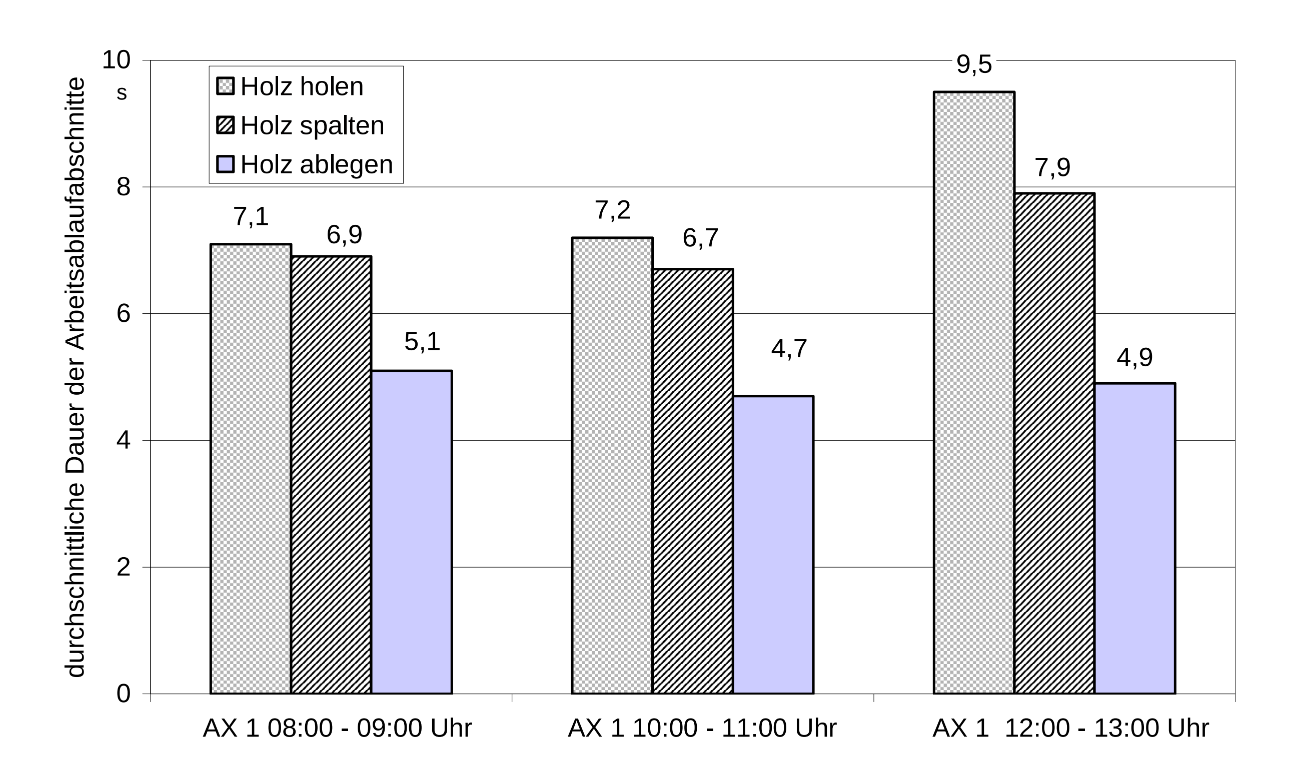


Abbildung 51: Durchschnittliche Dauer der drei einzelnen Arbeitsablaufabschnitte beim manuellen Spalten mit der Axt (AX 1) bei der Holzart Fichte

Mit dem Spalthammer wurden 33 cm lange Rundlinge (Rollen) von Fichte (Picea abies) und Buche (Fagus sylvatica) gespalten. Ein Vergleich der Werte zum Axtspalten und zum Spalthammerverfahren lässt sich für die Holzart Fichte darstellen (Abbildung 52). Dabei zeigt sich, dass der Arbeitsablaufabschnitt "Holz holen" beim Spalthammer mit durchschnittlich 5,4 s besser bewertet ist als beim Spalten mit der Axt (7,9 s), was einen weiteren Hinweis auf die bessere Arbeitsplatzgestaltung liefert. Der Spalthammer ist schwerer als eine Axt, so dass sich auf Grund des unterschiedlichen Arbeitsgerätes für den Spaltvorgang selbst ein größerer Zeitbedarf als für das Axtspalten ergibt (Abbildung 52). Hinzu kommt, dass das Holz beim Spalthammereinsatz aus Rundlingen mit durchschnittlich 14,3 cm (Fichte) Mittendurchmesser bestand, während die Axt zum Zerkleinern von wesentlich dünneren, bereits vorgespaltenen Scheiten verwendet wurde. Folglich ist die Zeit für das Spalten mit dem Spalthammer mit 33,3 s deutlich größer, sie liegt beim 4,7-fachen der Zeit für das Axtspalten.

Die Arbeitsleistung (Produktivität) lag beim Spalthammereinsatz bei 0,43 Fm/AKh bei Fichtenholz bzw. bei 0,12 Fm/AKh bei Buchenholz, das entspricht umgerechnet 1,08 bzw. 0,29 SRm/AKh und liegt deutlich unter dem Wert für das Axtspalten (1,3 SRm/AKh bei Fichte, siehe oben). Die Umrechnung erfolgte hierzu nach den Ergebnissen aus Kapitel 5.6.

Der beträchtliche Unterschied zwischen den Holzarten ist auf die Holzstruktur und möglicherweise auf den Wassergehalt zurückzuführen. Das Holz der Buche ist härter und war zum Spaltzeitpunkt schon etwas getrocknet. Hinzu kommt, dass die Buchenrundlinge mit durchschnittlich 21,6 cm Durchmesser deutlich stärker und damit schwerer als die Fichtenrundlinge (14,3 cm Durchmesser) waren. Für das manuelle Spalten mit einem Spalthammer sind große Durchmesser

besonders nachteilig, das gilt prinzipiell umso mehr auch für das Axtspalten, welches aber nur in einer einzigen Holzstärke untersucht worden war.

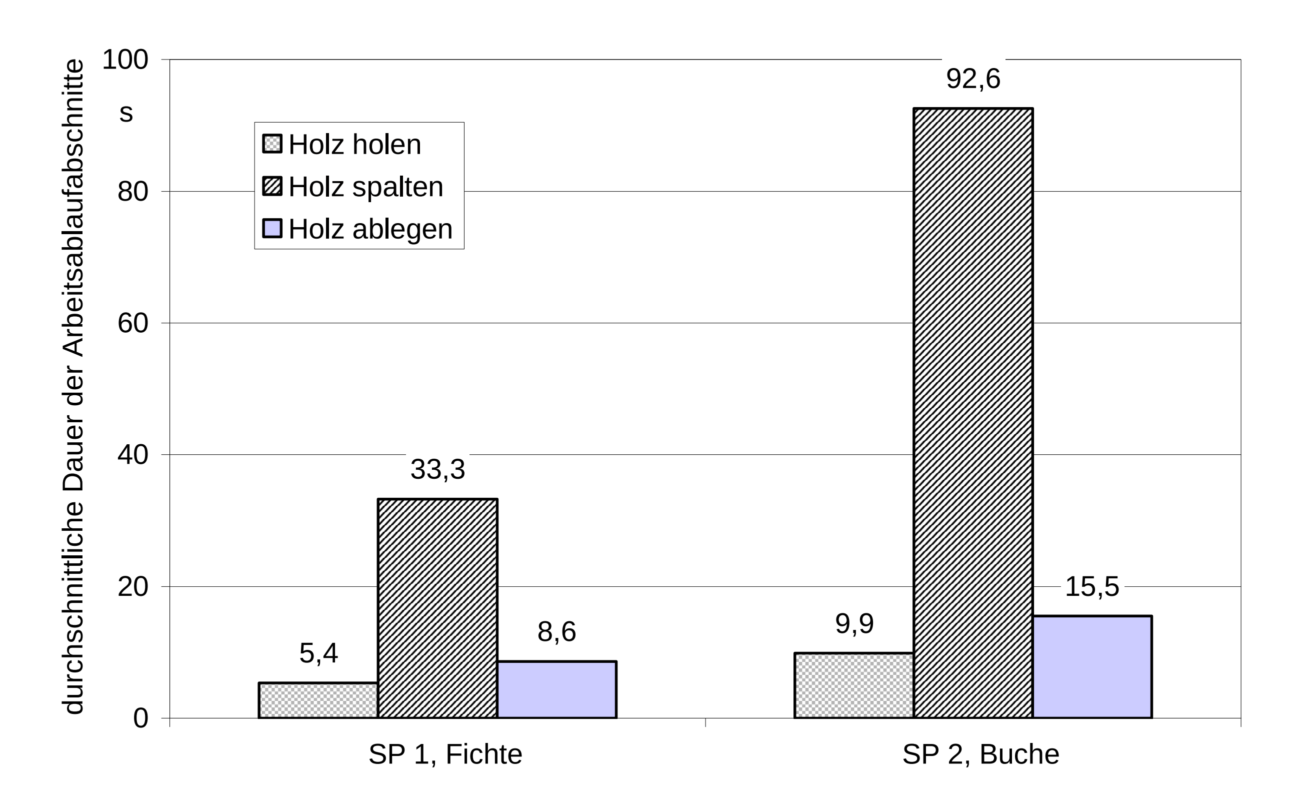


Abbildung 52: Durchschnittliche Dauer in Sekunden der drei einzelnen Arbeitsablaufabschnitte beim manuellen Spalten mit dem Spalthammer (Teilstudien SP 1 und 2)

5.2.2 Spalten mit kleinem Senkrechtspalter

Für das Spalten mit dem kleinen Senkrechtspalter (KS) wird nur eine einzelne Arbeitskraft benötigt (Abbildung 53). Bei den Probanden handelte es sich um den oben beschriebenen jungen Diplom Forstwirt, der als leistungsfähig einzustufen ist. In insgesamt sechs Teilstudien KS 1 bis 6 wurde das Spalten von insgesamt 332 Buchen- und 419 Fichtenholzrundlingen (Fagus sylvatica, Picea abies) mit 33 cm Länge über eine Dauer von insgesamt 06:52 h untersucht, wobei keine verschiedenen Spalterfabrikate eingesetzt wurden. Die Maschinen und Einsatzbedingungen zu den Messungen sind in Anhang 11.1 in Steckbriefform zusammengestellt.

Als Ausgangsmaterial wurden Rundlinge mit einem mittleren Mittendurchmesser von 12,3 cm verwendet, dieses Rohmaterial ist durch die Mittendurchmesserverteilung in Abbildung 54 beschrieben. Vor allem der Vergleich der Hölzer in Teilstudien KS 1 und 2 mit KS 6 zeigt, dass unterschiedliche Sortimente verwendet werden. Die Teilstudie KS 5 hat eine zum Gesamtmittelwert ähnliche Verteilung und kann daher als typisch für das hier betrachtete Ausgangsmaterial angesehen werden (vgl. Abbildung 54, Gesamt KS).



Abbildung 53: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit kleinem Senkrechtspalter

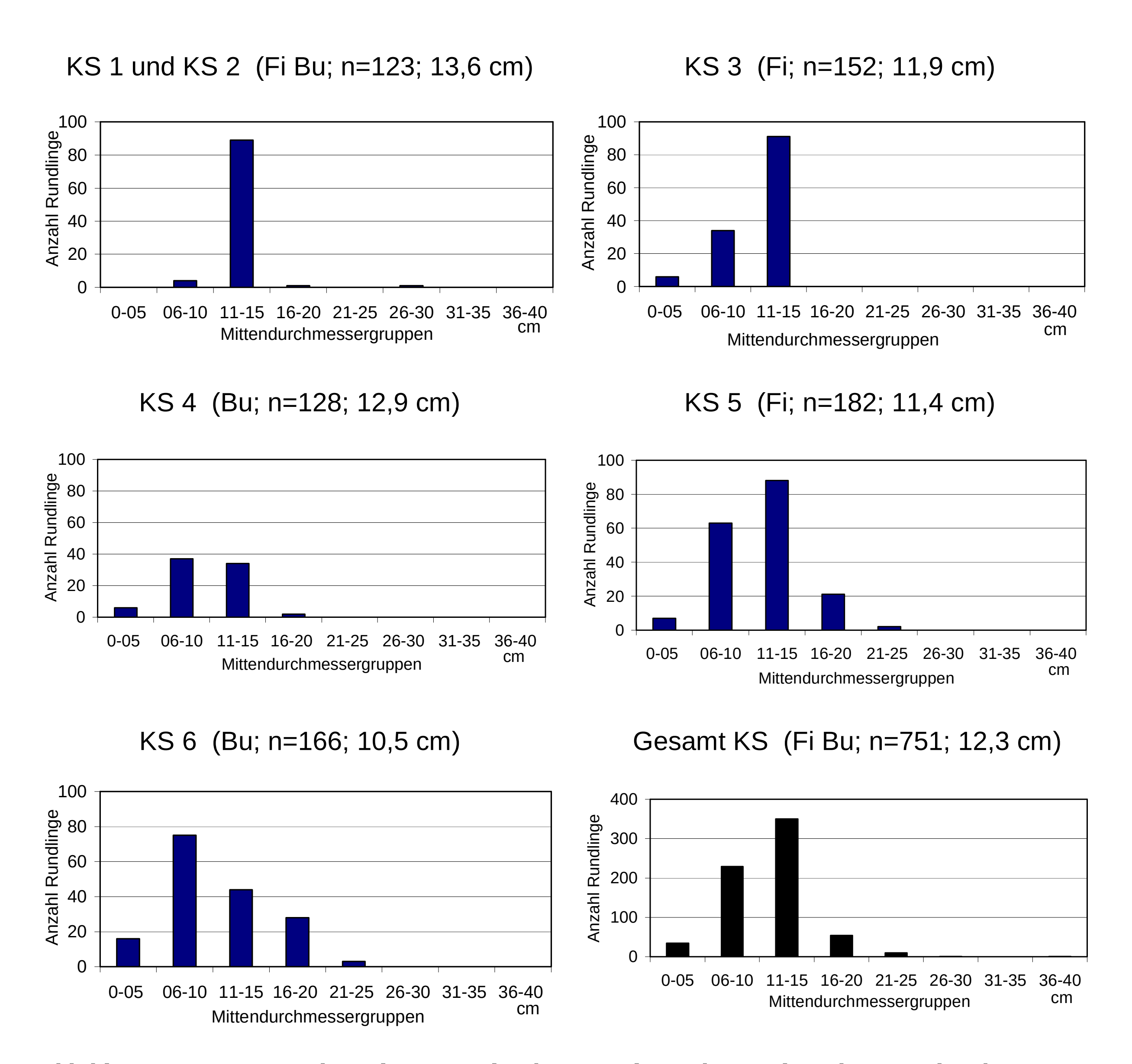


Abbildung 54: Die Verteilung der Mittendurchmesser des Holzes in den Kleine-Senkrecht-spalter(KS)-Studien. Grafiktitel mit Baumart, Anzahl Rundlingen und mittlerem Mittendurchmesser

Wenn die Arbeit am kleinen Senkrechtspalter optimal organisiert ist erreicht das eigentliche Spalten einen Anteil von bis zu 70 % des gesamten Arbeitsablaufs, das zeigt die Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte der Teilstudie KS 3 in Abbildung 55. Die restlichen 30 % teilen sich die Arbeitsablaufabschnitte "Holz holen" und "Holz ablegen" zu ungefähr gleichen Teilen. Abweichungen davon spiegeln die unterschiedlichen Weglängen von bzw. zu den jeweiligen Holzlagern wider. In den Teilstudien KS 1 und 2 wurde beim "Holz spalten" der Ablaufabschnitt "Zurechtrücken" extra notiert, wenn die Arbeitskraft Zeit damit verbrachte, für den Rundling die optimale Position für das Eindringen des Senkbeils zu finden und einen sicheren Halt zu bekommen. Dabei nimmt der Anteil für dieses "Zurechtrücken" in der Teilstudie KS 1 bei den gleichmäßig geformten Fichtenrundlingen 9 % ein, wohingegen es bei der Teilstudie KS 2 bei den astigeren und unförmigeren Buchenrundlingen auf 18 % anstieg, obwohl der mittlere Durchmesser der Rundlinge

mit 13,4 cm bei KS 1 und 13,7 cm bei KS 2 ähnlich war. In den übrigen Teilstudien wurde der Abschnitt "Zurechtrücken" nicht extra gemessen und ist im Abschnitt "Holz spalten" enthalten.

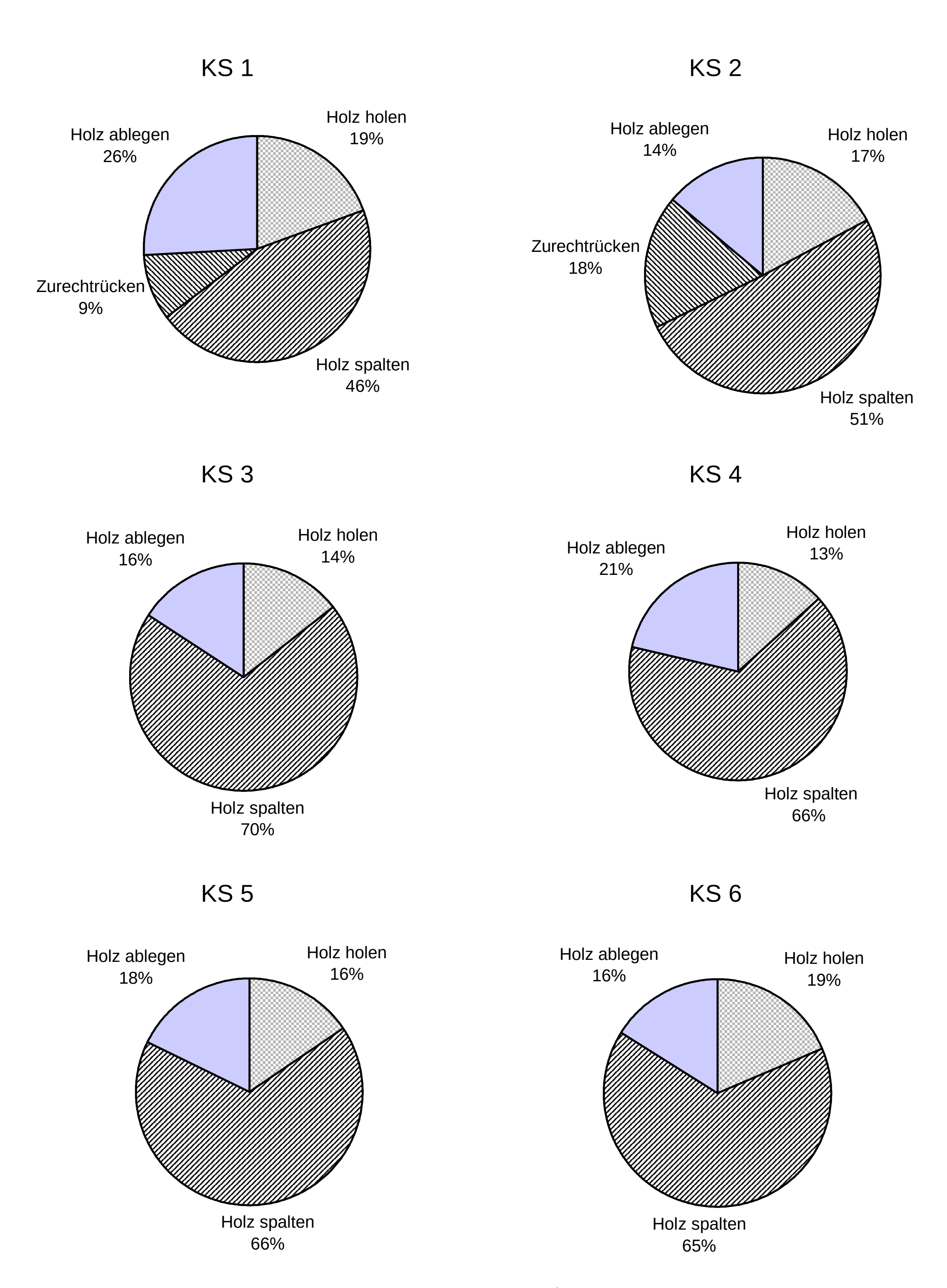


Abbildung 55: Die zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in den Kleine-Senkrecht-spalter(KS)-Studien

Die Tatsache, dass das Volumen der Rundlinge durch Einzelmessungen vor dem Spalten festgestellt worden war (vgl. Kapitel 4.1.3.1), erlaubt weitergehende Auswertungen zu den Zeitstudien. In Abbildung 56 (links) ist beispielsweise dargestellt, dass die Zyklusdauer, d. h. die Zeitsumme der Arbeitsablaufabschnitte "Holz holen", "Holz spalten" und "Holz ablegen", mit dem steigenden Mittendurchmesser – das heißt mit dem Rundlingsvolumen – ansteigt. Folgerichtig kam es nicht, wie ursprünglich erwartet, zu einem Anstieg der technischen Arbeitsproduktivität (TAP) mit steigendem Mittendurchmesser. Das verdeutlicht eine entsprechende Regressionsanalyse über die Durchmesser in allen Teilstudien, sie ergab hierfür einen nicht-signifikanten Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von lediglich R^2=0,08 (Abbildung 56, rechts). Dieses Ergebnis zeigt, dass sich die erschwerte Handhabbarkeit größerer Scheite hier offenbar so sehr zyklusverlängernd auswirkt, dass sich die Arbeitsleistung nicht weiter steigert. Hierin spiegelt sich auch der bei diesem Aufbereitungsverfahren immer noch hohe Handarbeitsanteil bzw. der relativ geringe Mechanisierungsgrad wider.

Zusätzlich lassen sich aus den Regressionsanalysen in Abbildung 56 (rechts) noch weitere Erklärungen bzw. Ursachen für diesen fehlenden Zusammenhang ablesen. So ist die Streuung der "momentanen" technischen Arbeitsproduktivität (TAP) mit Werten bis 1,2 Fm/AKh bis zu einem Mittendurchmesser von 7 cm der Rundlinge zunächst vergleichsweise hoch, bei 8 cm wieder niedriger, aber bis 16 cm erneut ansteigend. Der Grund hierfür liegt in der Häufigkeit des Spaltens. Bis etwa 7 cm Mittendurchmesser wird häufig gar nicht gespalten, was eine sehr kurze Zyklusdauer und damit eine hohe TAP, selbst bei Rundlingen mit geringem Volumen, zur Folge hat. Bis etwa 16 cm Mittendurchmesser wird der Rundling dann einmal gespalten, somit ändert sich die Zykluszeit von 8 bis 16 cm kaum (Abbildung 56, links). Da sich aber das bearbeitete Volumen vergrößert, steigt die TAP in dieser Spanne. Bei größeren Mittendurchmessern muss der Rundling dann mehr als einmal gespalten werden. Außerdem werden die Rundlinge zunehmend unhandlich, bereits gespaltene Teilstücke müssen neben dem Spalter vorübergehend abgelegt werden, um die Arbeitsfläche frei zu halten, wodurch die Zyklusdauer überproportional steigt und die TAP sinkt. Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass beim Spalten mit dem kleinen Senkrechtspalter die Rundlinge mit 5 bis 7 cm (kein Spalten erforderlich) und etwa 16 cm Mittendurchmesser (nur einmal Spalten) die größten arbeitswirtschaftlichen Vorteile bieten.

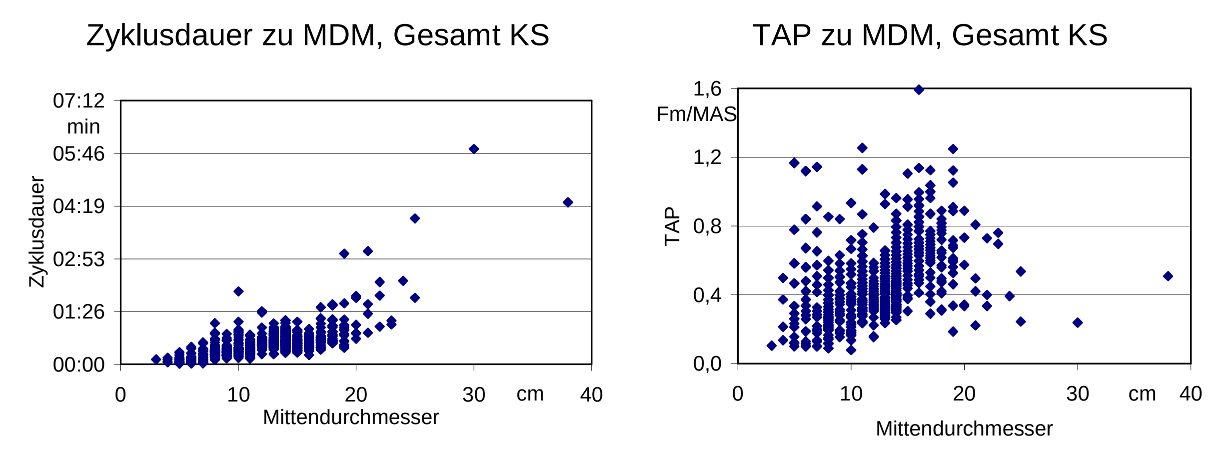


Abbildung 56: Zyklusdauer und technische Arbeitsproduktivität (TAP) in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser (MDM) der Rundlinge (Werte aus allen Kleine-Senkrecht-spalter(KS)-Studien)

Die gemessene Gesamtproduktivität in den Teilstudien zum kleinen Senkrechtspalter ist in Tabelle 10 zusammengestellt. Der Mittelwert liegt bei 0,43 Fm/AKh, wobei systematische Unterschiede zwischen Buchen- und Fichtenholz nur schwer erkennbar sind, allenfalls lassen sich für Buchenholz mit 0,49 Fm/AKh im Durchschnitt leichte Produktivitätsvorteile gegenüber der Fichte mit durchschnittlich 0,38 Fm/AKh erkennen.

Im Mittel aber liegt die Arbeitsproduktivität beim Senkrechtspalten damit nicht höher als beim händischen Einsatz eines Spalthammers mit Fichtenrundlingen (vgl. Kapitel 5.2.1). Allerdings erscheint es zulässig, dass die Produktivität des Senkrechtspaltens – im Gegensatz zur Axt- oder Spalthammerarbeit – durchaus auch über einen längeren Zeitraum angesetzt werden kann (keine Pause nach 1 Stunde), wenngleich die Daten hier noch keine gezielte Auswertung zur Ermüdung des Bedienpersonals ermöglichen. Als Fazit bleibt aber festzuhalten, dass der Einsatz des kleinen Senkrechtspalters im Vergleich zur Axt- und Spalthammerarbeit primär einer dauerhaften Produktivitätssteigerung dient. Außerdem tritt eine Arbeitserleichterung ein (vgl. hierzu Kapitel 5.3.2.2).

Tabelle 10: Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) und mittlere Zyklusdauer in den Kleinen-Senkrechtspalter(KS)-Studien. Eine Arbeitskraftstunde AKh entspricht hier einer Maschinenarbeitsstunde MAS

Teilstudie	Baumart	mittlere Zyklusdauer [s]	TAP [Fm/AKh][a]	TAP [Rm/AKh][b]
KS 1	Fichte	43,9	0,23	0,36
KS 2	Buche	80,6	0,47	0,76
KS 3	Fichte	28,4	0,50	0,78
KS 4	Buche	30,4	0,59	0,95
KS 5	Fichte	33,9	0,40	0,62
KS 6	Buche	21,4	0,40	0,64
Mittelwert		39,8	0,43	0,69

[a] Berechnung: Gesamtholzmenge je Arbeitskraftstunde (AKh), berechnet aus der Gesamtarbeitszeit GAZ, d. h. ggf. inklusive Rüst-, Stör- und Verteilzeiten

[b] Umrechnung von Fm zu Rm nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.6.1); hier: Rm mit 33 cm Scheiten, gestapelt

5.2.3 Spalten mit großem Senkrechtspalter

Auch beim Spalten mit dem großen Senkrechtspalter (GS) wird oft nur eine einzelne Arbeitskraft benötigt, das war zum Teil auch in den hier durchgeführten Teilstudien der Fall. In drei Fällen (GS 4, 5 und 6) kam es aber auch zur Mitarbeit einer weiteren Person. Bei den Probanden handelte es sich um den oben beschriebenen jungen Diplom Forstwirt, der selten mit dem großen Senkrechtspalter spaltet und daher bei diesem Gerät eher als Laie einzustufen ist, bzw. um einen jungen Landwirt, der regelmäßig mit dem Senkrechtspalter umgeht sowie um einen Brennholzhändler, der sehr oft mit einem Senkrechtspalter spaltet und daher als Profi einzustufen ist. In den Teilstudien wurde das Spalten von insgesamt 1019 Rundlingen mit 1 m Länge der Baumarten Buche

(Fagus sylvatica) und Fichte (Picea abies) über eine Dauer von insgesamt 12:31 h untersucht (zu den Holzarten der Teilstudien siehe Tabelle 11), wobei drei verschiedene Spalterfabrikate eingesetzt wurden. Die Maschinen und Rahmenbedingungen zu den Messungen sind in Anhang 11.1 in Steckbriefform zusammengestellt.



Abbildung 57: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit großem Senkrechtspalter (hier: Spaltbrummi, Fa. Vogesenblitz)

Als Ausgangsmaterial wurden Rundlinge mit einem mittleren Mittendurchmesser von 20,1 cm verwendet. Wie erwartet kam es hier im Vergleich zum kleinen Senkrechtspalter zu einer Verschiebung hin zu größeren Durchmessern, im Mittel beträgt diese Zunahme 7,7 cm. Besonders große Durchmesser lagen beim Sortiment der Teilstudie GS 5 vor (Abbildung 58), hier wurde Holz von ca. 60-jährigen Bäumen ab einem Zopfdurchmesser von 8 cm vollständig zu Brennholz verarbeitet. Dennoch sind die meisten Rundlinge der Mittendurchmesserklasse von 16 bis 20 cm zuzuordnen, gefolgt von der Klasse 11 bis 15 cm (Abbildung 58, Gesamt GS). Die schiefe Durchmesserverteilung ist dabei typisch, jeder Baum verjüngt seinen Stamm mit zunehmender Höhe, so dass bei den Meter-Rundlingen kleine Mittendurchmesser immer vorkommen, größere jedoch nur bei älteren Bäumen. Außerdem werden Sortimente mit kleinen Mittendurchmessern für die Brennholznutzung bevorzugt, während größere Sortimente als Nutzholz höhere Einnahmen erzielen.

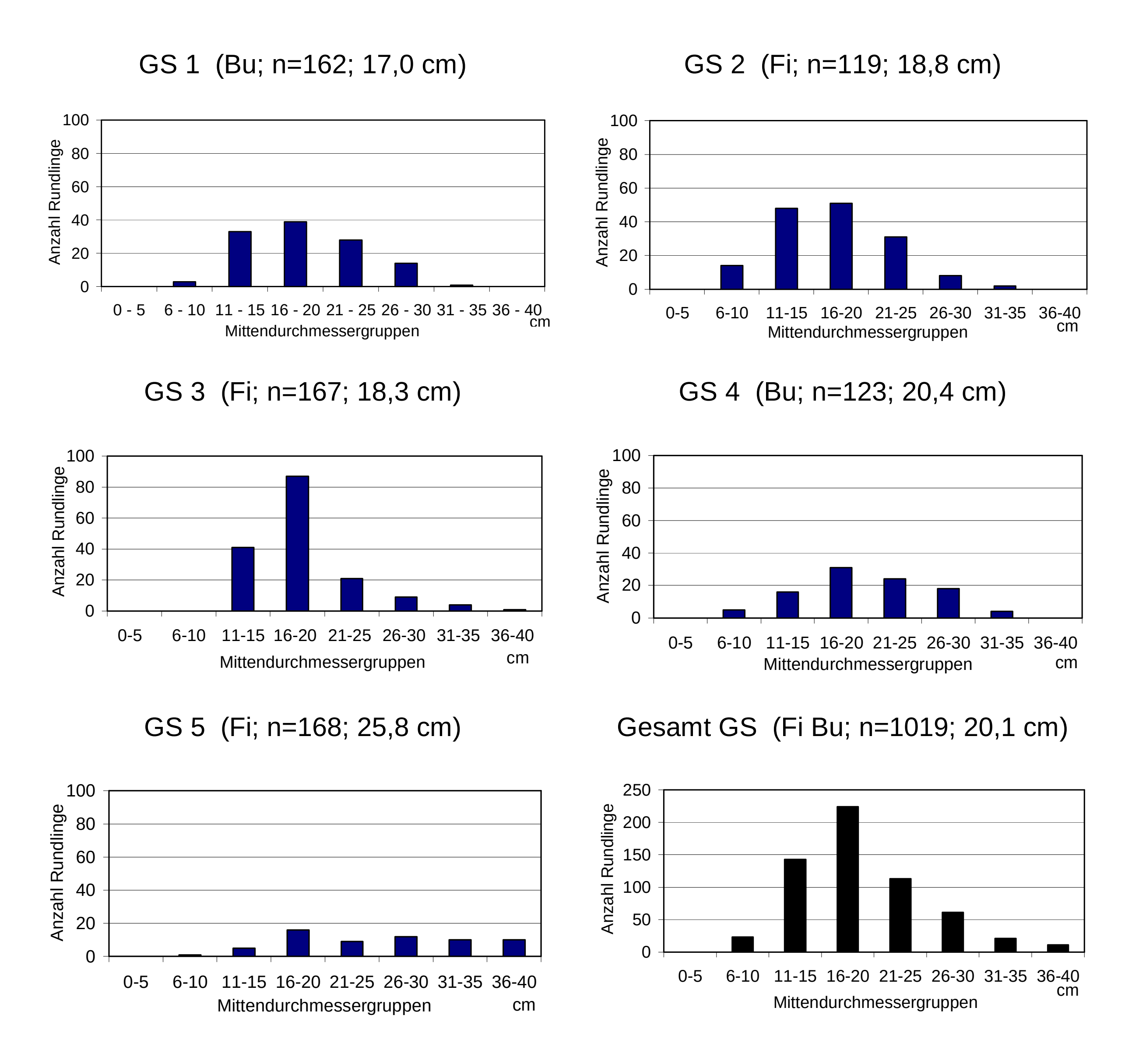


Abbildung 58: Die Verteilung der Mittendurchmesser des Holzes in den Große-Senkrecht-spalter(GS)-Studien. Grafiktitel mit Baumart, Anzahl Rundlingen und mittlerem Mittendurchmesser. Teilstudie GS 6 nicht dargestellt (keine Einzelvolumenbestimmung)

Wie bei der Studie zum kleinen Senkrechtspalter ist die Gestaltung des Arbeitsplatzes optimal, wenn, wie in der Teilstudie GS 3 (Abbildung 59), 70 % der Arbeitsablaufabschnittsanteile auf das Spalten und der Rest gleichmäßig auf "Holz holen" und "Holz ablegen" verteilt sind. Allerdings ist die Arbeit offenbar relativ anstrengend, denn der gleiche Proband, der bereits in den Studien zum kleinen Senkrechtspalter (KS) beobachtet wurde, musste bei den Teilstudien GS 1 und GS 2 kleine Erholungspausen einlegen (PVZ, persönliche Verteilzeit); dies war beim kleinen Senkrechtspalter nicht der Fall. In den Teilstudien GS 1 und 2 war die Gestaltung des Arbeitsplatzes nicht optimal, die beiden Lagerplätze für das Buchenholz in GS 1 waren vom Spalter zu weit entfernt; durch häufigeres Versetzen des Schleppers mit Spalter hätte viel Zeit eingespart werden können.

Bei den Teilstudien GS 4 und GS 5 waren zwei Arbeitskräfte im Einsatz. Speziell bei GS 5 wurde das Holz vom Probanden nur neben den Spalter fallen gelassen, von wo es der Helfer aufnahm und stapelte. Daraus erklärt sich der nur 7%ige Zeitanteil für "Holz ablegen", denn die Verteilung gibt ausschließlich Auskunft über die Arbeit am Spalter. In den drei Teilstudien GS 3 bis GS 5 wurde der Abschnitt "Zurechtrücken" nicht separat erfasst. Er ist im Abschnitt "Spalten" enthalten. In den GS-Studien waren die Probanden so geübt, dass nur sehr wenig zurechtgerückt wurde.

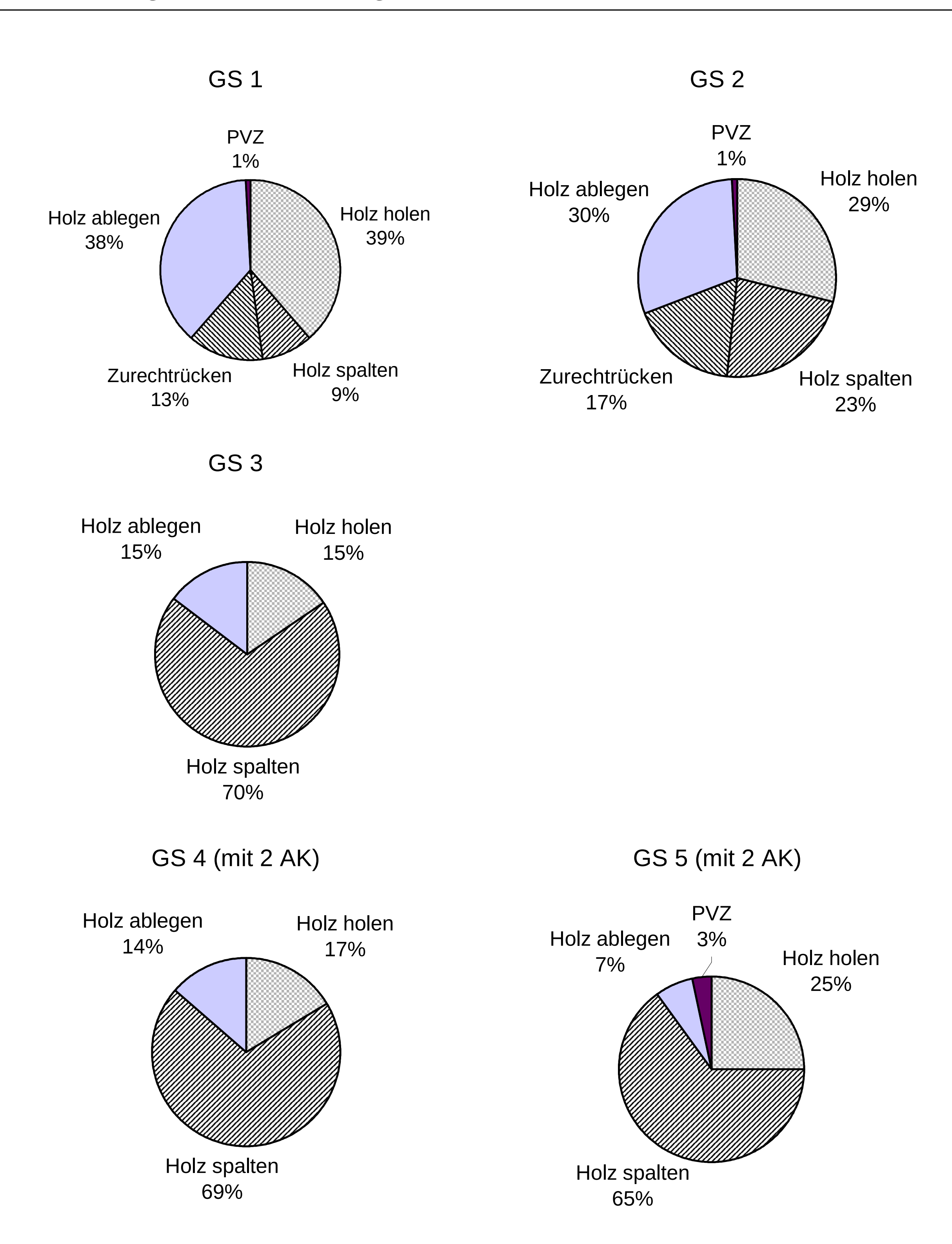


Abbildung 59: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in den Große-Senkrecht-spalter(GS)-Studien. Teilstudie GS 6 nicht dargestellt (keine einzelnen Ablaufabschnitte gemessen). AK Arbeitskräfte

Die Messung der Einzelvolumina der Rundlinge ermöglicht auch hier die Betrachtung der Zykluszeiten in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser des Holzes (Abbildung 60). Mit Ausnahme der Teilstudien GS 1 und 2, in denen das Bestimmtheitsmaß mit R^2=0,22 relativ niedrig ist, zeigt sich bei den übrigen Teilstudien hierfür ein klarer Zusammenhang. In den Studien GS 1 und 2 war

anstelle des sonst üblichen Senkbeils ein Senkkreuz verwendet worden, folglich erhöht sich die Zyklusdauer bei steigendem Durchmesser nur unerheblich, da mit dem Senkkreuz auch dickere Rundlinge in nur einem Arbeitsgang gespalten werden konnten.

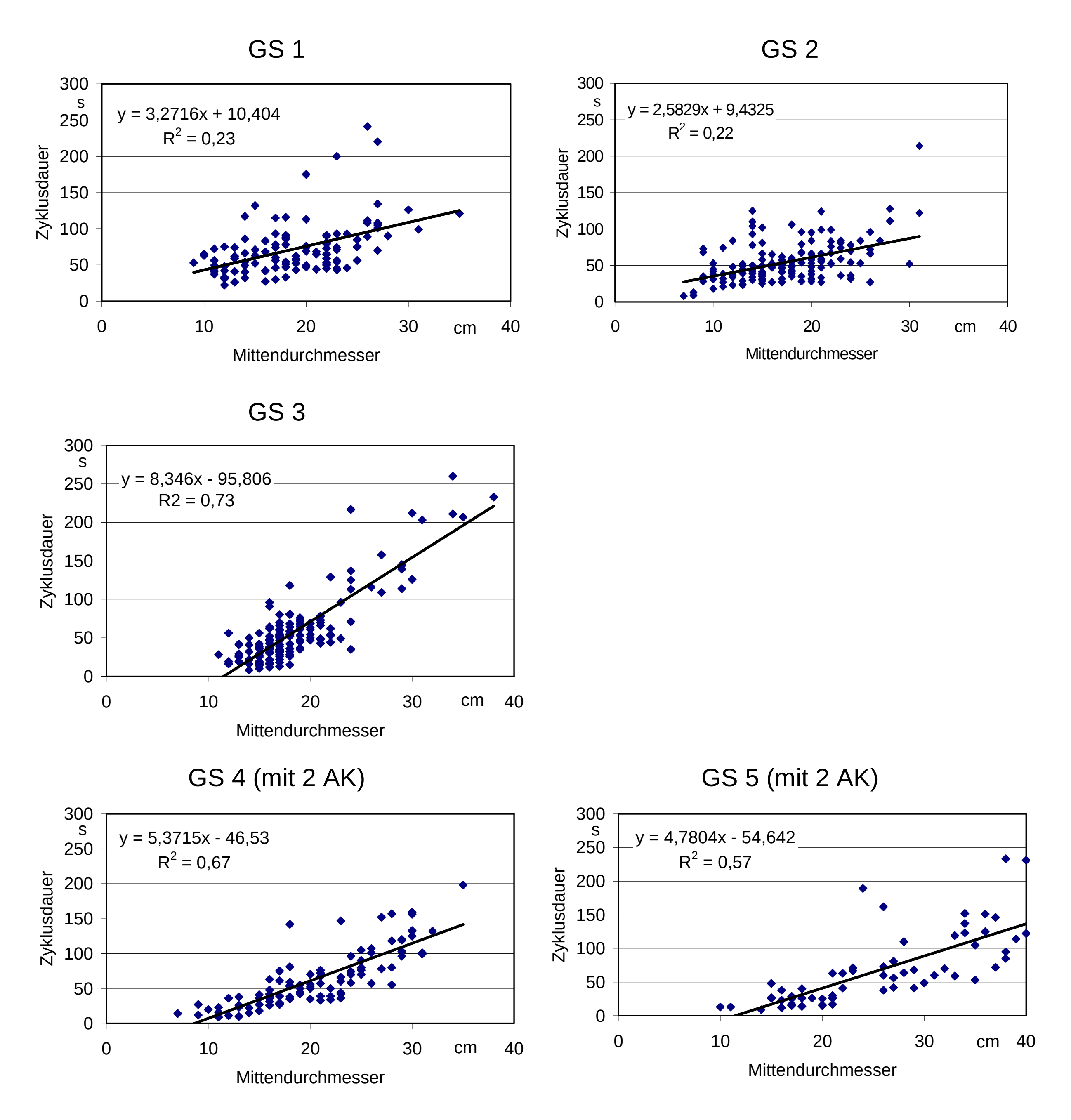


Abbildung 60: Zyklusdauer in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge bei den Große-Senkrechtspalter(GS)-Studien. Teilstudie GS 6 nicht dargestellt (keine einzelnen Ablaufabschnitte gemessen)

Wie beim kleinen Senkrechtspalter (Kapitel 5.2.2) ist auch beim großen Senkrechtspalter meist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der "momentanen" technischen Arbeitsproduktivität (TAP) und dem Mittendurchmesser der Rundlinge zu erkennen (Abbildung 61). Lediglich in den

Teilstudien GS 1 und GS 2 zeigt sich wegen der etwas größeren Konstanz der Zykluszeiten eine leichte Korrelation, das Bestimmtheitsmaß ist aber mit maximal R^2=0,42 nicht sehr hoch.

Eine Bestimmung des idealen Mittendurchmessers für Rundlinge ist für den großen Senkrechtspalter nicht möglich. Statt dessen muss hierfür eine Bandbreite angegeben werden; sie liegt bei ca. 15 bis 25 cm, in diesem Bereich wurden in den Versuchen die höchsten Stundenleistungen erzielt. Bei Verwendung eines Spalters mit Senkkreuz (Teilstudien GS 1 und GS 2) ist die höchste momentane Produktivität am oberen Ende dieser Bandbreite zu erwarten (Abbildung 61).

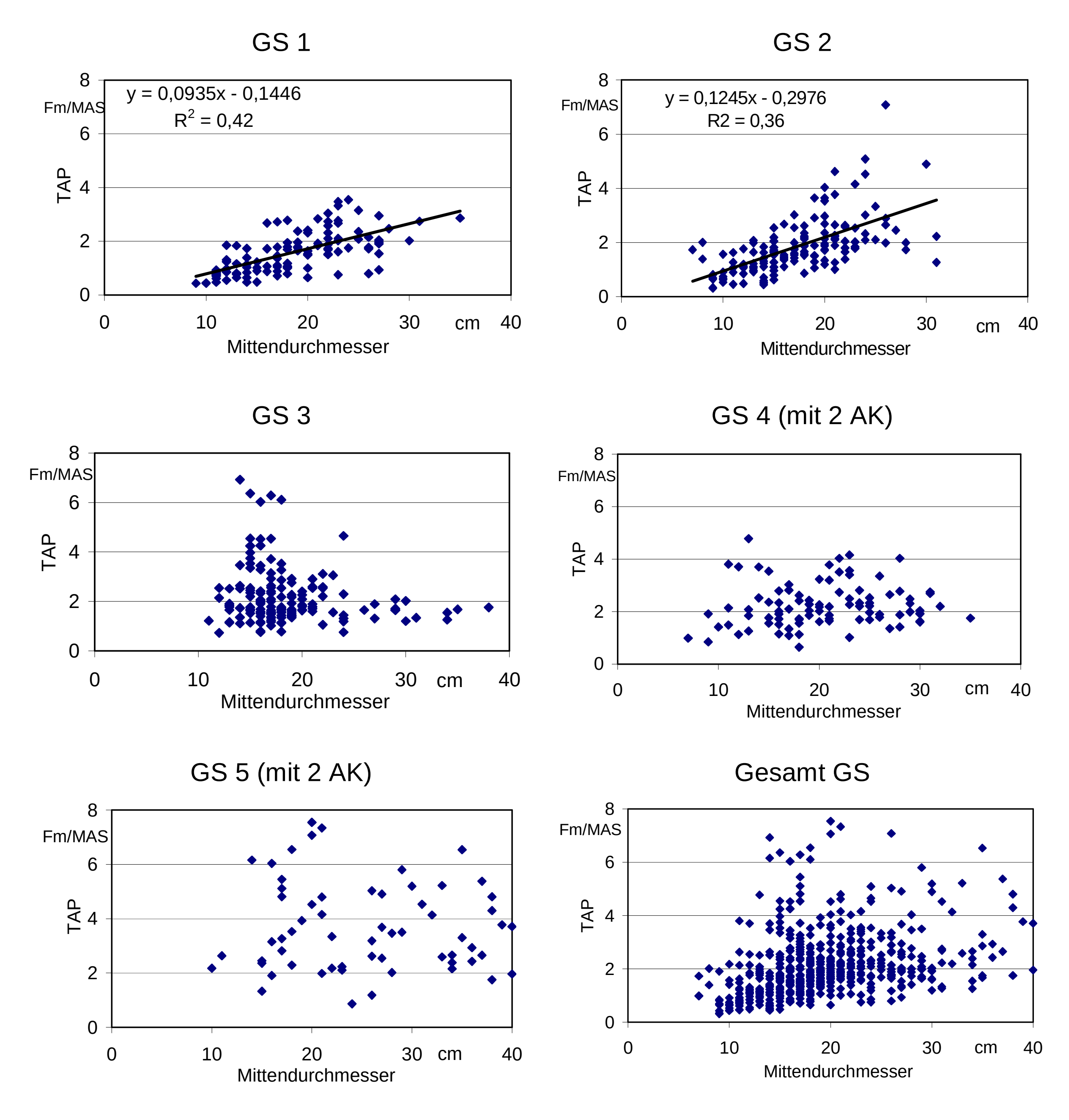


Abbildung 61: Technische Arbeitsproduktivität (TAP) je Maschinenstunde beim Einsatz des großen Senkrechtspalters in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge. AK Arbeitskräfte

Die gemessene Gesamtproduktivität in den einzelnen Teilstudien zum großen Senkrechtspalter (GS) ist in Tabelle 11 zusammengestellt. Gegenüber den Arbeiten mit dem kleinen Senkrechtspalter (Kapitel 5.2.2) steigt hier die mittlere Produktivität deutlich auf einen Durchschnittswert von 2,8 Rm/AKh. Hier wirken sich das insgesamt größere Arbeitsgerät und vor allem die große Scheitlänge vorteilhaft aus. Allerdings muss das nunmehr gespaltene Meterholz meist noch weiter zu ofenfertigen Kurzscheiten zerkleinert werden, daher sind die beiden Prozesse nicht ohne weiteres direkt miteinander vergleichbar.

Tabelle 11: Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) je Arbeitskraftstunde und mittlere Zyklusdauer in den Großen-Senkrechtspalter(GS)-Studien. Berechnung der TAP je Maschinenarbeitsstunde MAS bzw. Arbeitskraftstunde AKh aus Gesamtholzmenge und Gesamtarbeitszeit (GAZ). n.b.: nicht bestimmt

Teil-studie	Baumart	Mittlere Zyklusdauer [s]	Technische Arbeitsproduktivität (TAP) des Maschineneinsatzes		des Arbeitskrafteinsatzes	
			TAP [Fm/MAS]	TAP [Rm/MAS]	TAP [Fm/AKh][a]	TAP [Rm/AKh][b]
GS 1	Buche	54,5	1,7	3,4	1,7	3,4
GS 2	Fichte	70,0	1,6	2,9	1,6	2,9
GS 3	Fichte	57,7	1,8	3,2	1,8	3,2
GS 4	Buche	62,9	2,1	4,2	1,1[c]	2,1[c]
GS 5	Fichte	67,3	3,1	5,6	1,6[c]	2,8[c]
GS 6[d]	Gemischt	n.b.	2,3	4,3	1,2[c]	2,2[c]
Mittelwert		62,5	2,1	3,9	1,5	2,8

[a] Berechnung: Gesamtholzmenge je Arbeitskraftstunde (AKh), berechnet aus der Gesamtarbeitszeit GAZ, d. h. ggf. inklusive Rüst-, Stör- und Verteilzeiten

[b] Umrechnung von Fm zu Rm nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.6.1); hier: Rm mit 33 cm Scheiten gestapelt

[c] Hier waren zwei Arbeitskräfte (AK) eingesetzt worden, die TAP wurde auf 1 AKh umgerechnet.

[d] Hier wurden nur die Gesamtarbeitszeit und das Gesamtholzvolumen bestimmt (keine Zyklen bzw. Einzelvolumina). Die Holzvolumenbestimmung erfolgte in den Stapelversuchen zu Kapitel 5.6.1

5.2.4 Spalten mit großem Waagerechtspalter

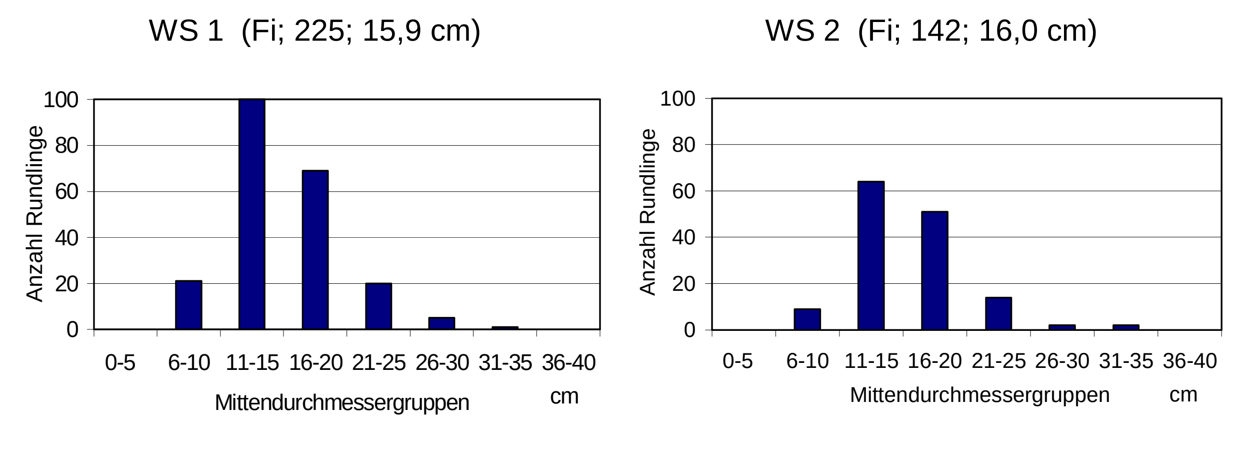
Beim Spalten mit dem großen Waagerechtspalter (WS) (Abbildung 62) arbeiten in der Regel zwei Personen an einem Gerät; ein Maschinist und ein Zubringer. Auch die vorliegenden Messungen wurden so durchgeführt. Bei den Probanden handelte es sich zum einen um einen Landwirt, der regelmäßig mit Waagerechtspaltern arbeitet und daher als professionell einzustufen ist (WS 3) und zum anderen um einen pensionierten Landwirt, der aufgrund seines Alters als semiprofessionell eingestuft wird (WS 1 und 2). Die Studie wurde in drei Teilstudien WS 1 bis 3 durchgeführt, darin erfolgte das Spalten von insgesamt 509 Rundlingen der Baumart Fichte (Picea abies) mit je 1 m Länge über eine Gesamtdauer von insgesamt 05:44 h. Es wurden zwei verschie-

dene Geräte untersucht. Die Maschinen und Rahmenbedingungen zu den Messungen sind in Anhang 11.1 in Steckbriefform zusammengestellt.

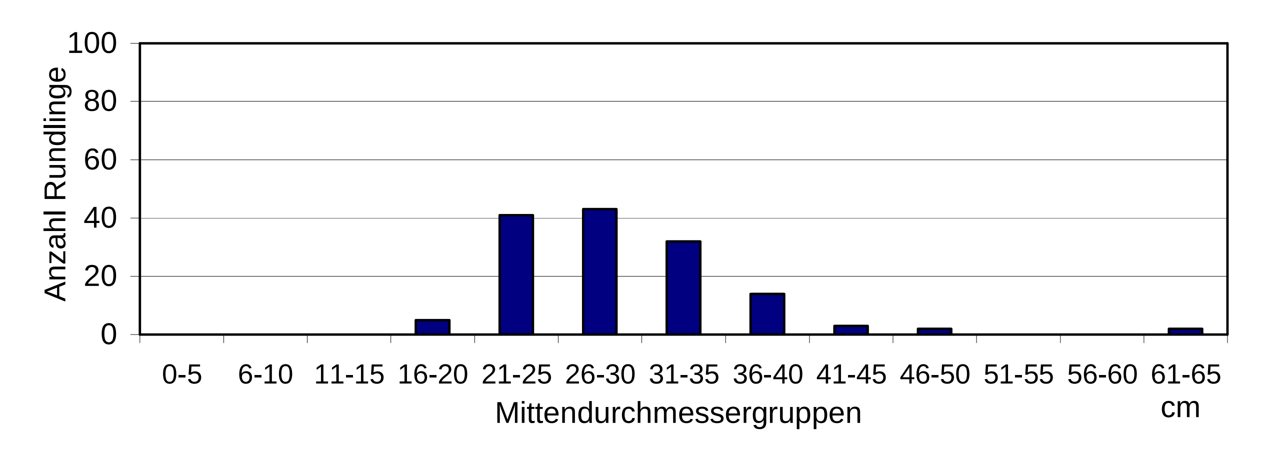


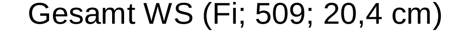
Abbildung 62: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit großem Waagerechtspalter (hier: Hydromax 24 t, Fa. Posch)

Der mittlere Mittendurchmesser bei den Studien WS 1 bis 3 ist mit 20,4 cm ähnlich dem der Studien zum großen Senkrechtspalter (GS) mit 20,1 cm. Bei den einzelnen Mittendurchmessern sind hier jedoch die Klassen 11 bis 15 cm gefolgt von 16 bis 20 cm am häufigsten vertreten (vgl. Abbildung 63; Gesamt WS). Allerdings werden auch vereinzelt sehr starke Sortimente verarbeitet, das zeigt die Größenverteilung zur Studie WS 3 mit einem mittleren Mittendurchmesser von 29,3 cm.



WS 3 (Fi; 142; 29,3 cm)





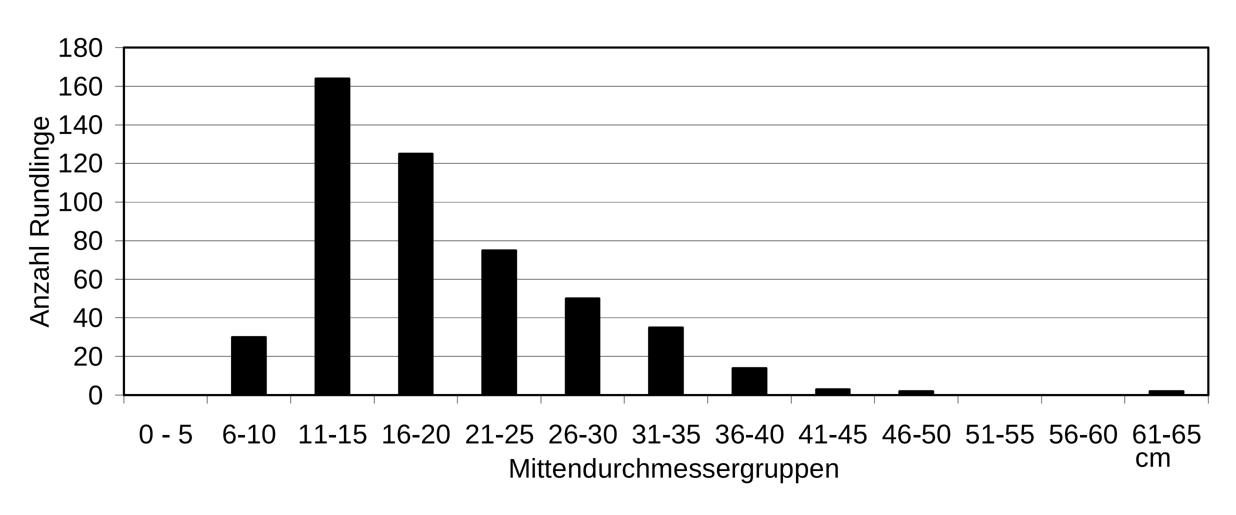


Abbildung 63: Die Verteilung der Mittendurchmesser des Holzes in den Waagerechtspalter(WS)-Studien. Grafiktitel mit Baumart, Anzahl Rundlingen und mittlerem Mittendurchmesser

Die Zeitanteile der gemessenen Arbeitsablaufabschnitte sind in Abbildung 64 dargestellt. Allerdings lassen sich die Teilstudien nicht ohne weiteres direkt miteinander vergleichen. In der Teilstudie WS 1 wurden die Handlungen der Arbeitskraft festgehalten, während in Teilstudie WS 2

und WS 3 die Bewegungen des Spalters aufgezeichnet wurde, wobei es sich aber in den Studien WS 1 und WS 2 um die gleiche Spaltvorrichtung handelte. Der Arbeitsablaufabschnitt "Holz ablegen" kam in keiner Teilstudie vor, denn bei WS 1 und 2 fiel das gespaltene Holz nach dem Spaltvorgang einfach zu Boden, während es bei WS 3 von einer Arbeitskraft abgenommen und sofort gestapelt wurde. Das Spaltkreuz kann bei Waagerechtspaltern auf den Mittelpunkt des Rundlingsquerschnitts justiert werden, um gleichmäßige Scheitstärken zu erhalten. Dieser Vorgang lief häufig so rasch und zeitgleich mit der ersten Vorwärtsbewegung des Stempels ab, dass eine Zeitaufnahme schwierig war. Des weiteren wurde die Hebevorrichtung nur bei Rundlingen mit größerem Durchmesser benutzt, denn in der Regel legten die Probanden die Rundlinge direkt von Hand in die Wanne vor den noch in Rückwärtsbewegung befindlichen Stempel. Allgemein ist für das Spalten mit dem großen Waagerechtspalter festzuhalten, dass ein Optimum erreicht ist, wenn ca. 70 % der Gesamtzeit auf den Spaltvorgang entfallen.

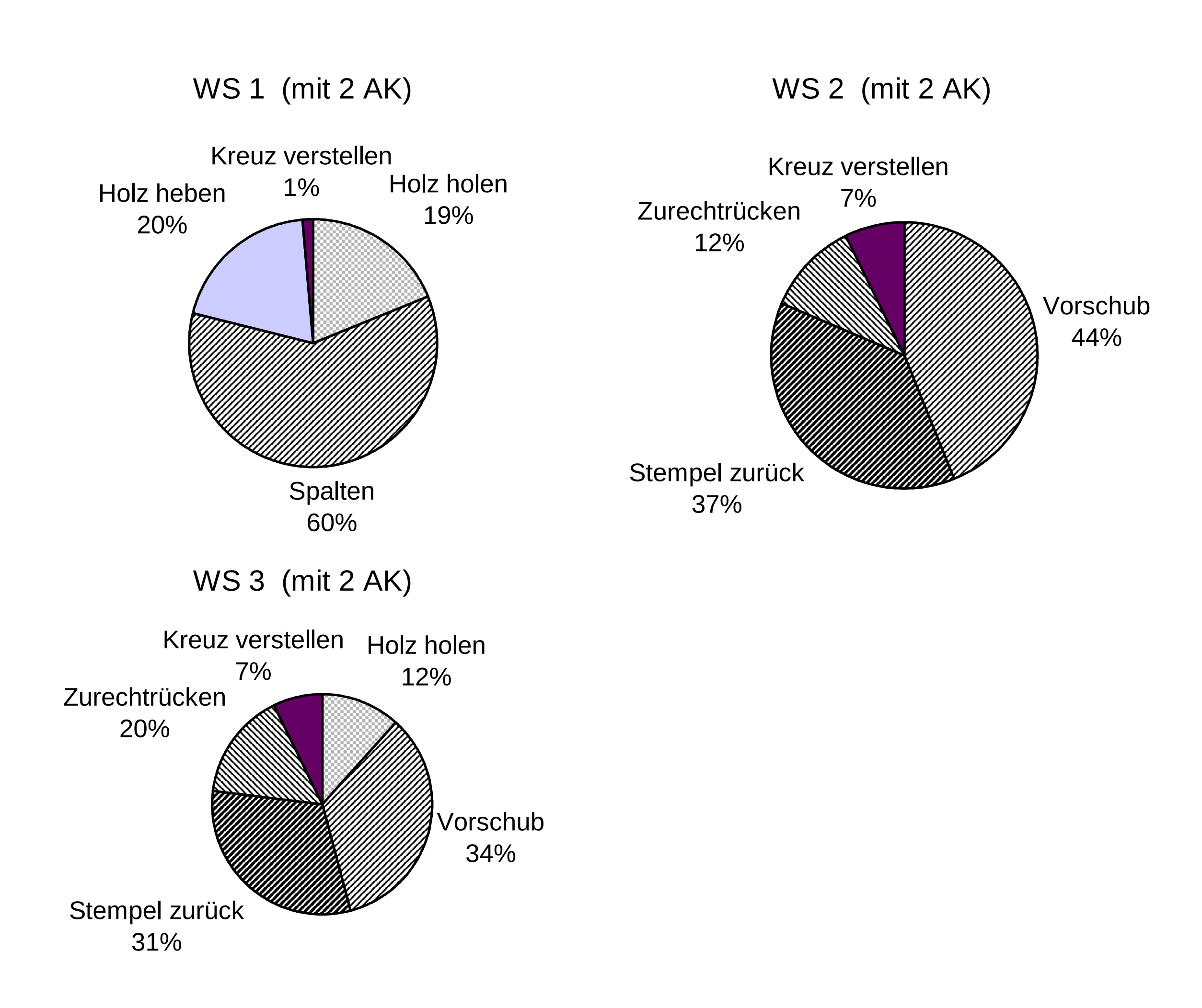


Abbildung 64: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in den Waagerechtspalter(WS)-Studien. AK Arbeitskräfte

Bis zu einem Mittendurchmesser der Rundlinge von 35 cm liegt die Zyklusdauer beim Waagerechtspalter relativ konstant bei ca. 30 Sekunden (Abbildung 65). Bei größeren Rundlingen steigt die Verarbeitungszeit je Rundling an, sie kann in der Spitze bei einem Mittendurchmesser von

65 cm über 7 Minuten betragen. Bei Betrachtung der gesamten Untersuchung (Abbildung 65, gesamt WS) lässt sich der Verlauf in drei Abschnitte aufteilen. Von 8 bis 25 cm Mittendurchmesser ist die Zyklusdauer konstant, von 25 cm bis 35 cm steigt sie leicht und von 35 bis 65 cm stark an.

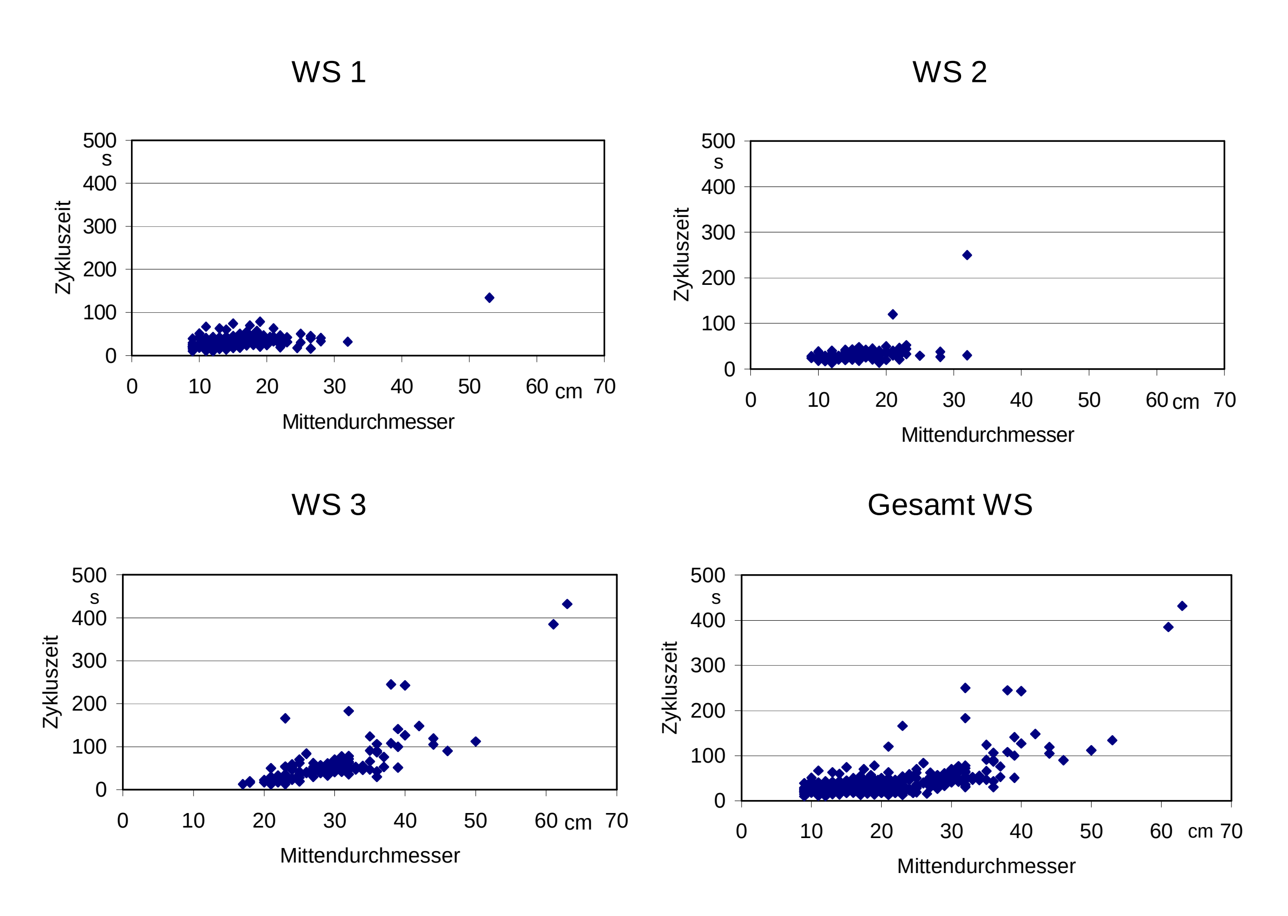


Abbildung 65: Zyklusdauer in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge bei den Waagerechtspalter(WS)-Studien

Aus den Ergebnissen zu den Zykluszeiten (Abbildung 66, Gesamt WS) lässt sich schließen, dass die optimale Holzstärke für den Waagerechtspalter bei einem Mittendurchmesser von ca. 30 cm liegt. Damit kann die "momentane" Produktivität der Maschine auf durchschnittlich 5 Fm/MAS ansteigen. Bis zu einem Mittendurchmesser von 20 cm steigt die Produktivität konstant an (von ca. 1 bis 3 Fm/MAS). In zwei von drei Teilstudien kam es danach zu einem deutlich verstärkten Anstieg bis zu einem Mittendurchmesser von 32 cm, wobei Durchsatzleistungen von bis 12 Fm/MAS erzielt wurden (Abbildung 66). Deutlich stärkere Rundlinge mit bis zu 65 cm Durchmesser führen dann aber wieder zu einer sinkenden Produktivität. Bei Häufung derartiger Holzstärken ist es daher empfehlenswert, entsprechend leistungsstärkere Geräte einzusetzen.

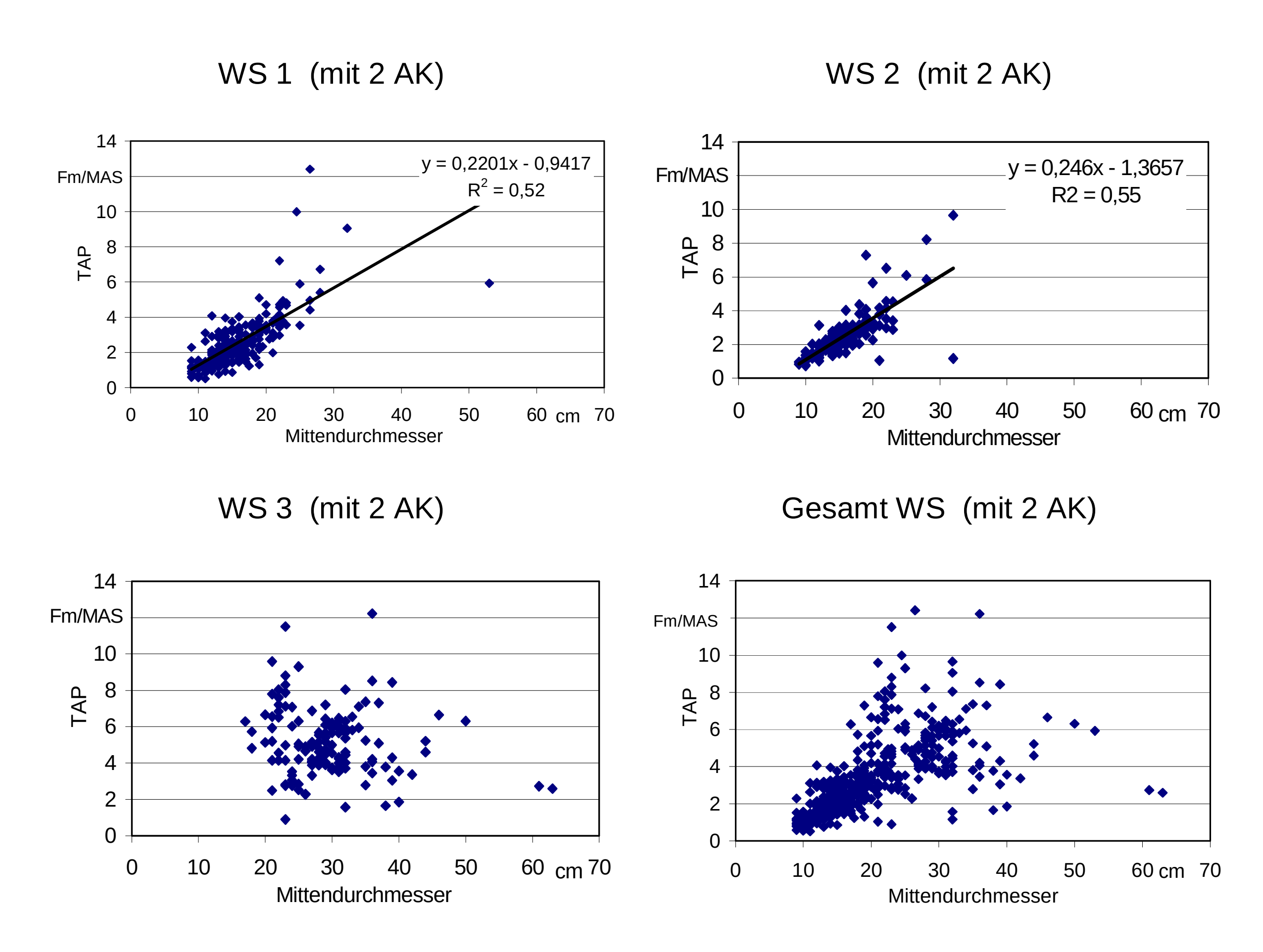


Abbildung 66: Technische Arbeitsproduktivität (TAP) je Maschinenstunde beim Einsatz des Waagerechtspalters (WS) in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge AK Arbeitskräfte

Die gemessene mittlere technische Arbeitsproduktivität (TAP) bezogen auf die Maschinen- bzw. Arbeitskraftstunde ist für die einzelnen Teilstudien in Tabelle 12 dargestellt. Während die Maschinenleistung gegenüber dem großen Senkrechtspalter von 3,9 auf 5,3 Rm/MAS steigt, zeigt sich bei der Produktivität des Arbeitskrafteinsatzes keine Veränderung, sie ist mit 2,8 (GS-Studie) und 2,7 Rm/AKh (WS-Studie) weitgehend konstant.

Tabelle 12: Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) des Maschinen- und Arbeitskräfteeinsatzes und mittlere Zyklusdauer in den Waagerechtspalter(WS)-Studien. Berechnung aus Gesamtholzmenge und Gesamtarbeitszeit GAZ, d h. ggf. inklusive Rüst-, Stör- und Verteilzeiten

Teil-studie	Baum-art	Mittlere Zyklusdauer [s]	Technische Arbeitsproduktivität (TAP)			
			des Maschineneinsatzes		des Arbeitskrafteinsatzes	
			TAP [Fm/MAS]	TAP [Rm/MAS][a]	TAP [Fm/AKh][b]	TAP [Rm/AKh][a, b]
WS 1	Fichte	31,7	2,4	4,3	1,2	2,2
WS 2	Fichte	31,9	2,4	4,3	1,2	2,2
WS 3	Fichte	60,0	4,0	7,2	2,0	3,6
Mittelwert		41,2	2,9	5,3	1,5	2,7

[a] Umrechnung von Fm zu Rm nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.6.1); hier: Rm mit 33 cm Scheiten, gestapelt

[b] Hier waren zwei Arbeitskräfte (AK) eingesetzt worden, die TAP wurde auf 1 AKh umgerechnet.

5.2.5 Sägen und Spalten mit der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine

Beim Sägen und Spalten mit der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK) arbeiten häufig zwei Personen an einem Gerät; ein Maschinist und ein Zubringer (Abbildung 67). Auch die vorliegenden Messungen wurden zum Teil so durchgeführt. Bei den Probanden handelte es sich um Laien (KK 3 bis 5), eine semi-professionell (KK 1) und einen professionell (KK 2) arbeitenden Probanden.



Abbildung 67: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK). Hier: Spaltfix 300, Fa. Posch)

In fünf Teilstudien KK 1 bis KK 5 wurde das gleichzeitige Ablängen und Spalten zu 33 cm Scheiten von insgesamt 494 Rundhölzern der Baumart Fichte (Picea abies), Esche (Fraxinus excelsior) und Buche (Fagus sylvatica) mit der durchschnittlichen Länge von 2,9 m über insgesamt 9:24 h untersucht, dabei kamen drei verschiedene Geräte zum Einsatz. Die Maschinen und Rahmenbedingungen zu den Messungen sind in Anhang 11.1 in Steckbriefform zusammengestellt.

Die Durchmesserverteilung der verwendeten Rundlinge zeigt Abbildung 68. Das am häufigsten verwendete Sortiment findet sich demnach in der Gruppe von 11 bis 15 cm Mittendurchmesser. Der Mittelwert von 15,2 cm liegt damit zwischen den Durchmessern der kleinen Senkrechtspalter-Studie mit 12,3 cm und dem der Großen-Senkrechtspalterstudie mit 20,1 cm. Der maximal mögliche Spaltdurchmesser wird für die eingesetzten Maschinen mit 30 cm bzw. 35 cm angegeben, jedoch wurde diese Holzstärke lediglich im Fall der Teilstudie KK 3 erreicht. Eher schwache Rundlinge kamen dagegen in der Studie KK 5 zum Einsatz, hier war die Durchmesserklasse von 6 bis 10 cm am häufigsten vertreten.

In der gemessenen Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte (Abbildung 69) tritt hier der Abschnitt "Störung" erstmalig auf, er weist einen Anteil von 1 bis 8 % auf. Eine Störung bedeutet eine Unterbrechung des Arbeitsvorganges und erfordert eine Behebung durch die Bedienperson. Meist handelt es sich dabei um das Verklemmen des Sägeblattes oder das Einklemmen von Holz im Spaltkreuz. Durch das Verwenden von gleichförmigem Ausgangsmaterial und durch zunehmende Erfahrung des Maschinenführers kann der Störungsanteil auf ca. 1 % des gesamten Arbeitsablaufes reduziert werden (vgl. Teilstudie KK 2 in Abbildung 69). Das typische Sortiment im Brennholzbereich ist jedoch normalerweise eher von minderer Qualität, so dass mit dem in der KK-Studie ermittelten durchschnittlichen Anteil von 4,8 % Störung bei diesen Maschinen gerechnet werden muss. Hinzu kommen maschinelle Verteilzeiten, wie z. B. – je nach Maschinentyp – das Wechseln der Sägekette oder das Schärfen des Sägeblattes. Diese Zeiten traten aber bei diesen Aufnahmen wegen der Aufnahmelänge von maximal zwei Arbeitstagen nicht in Erscheinung.

Bei der Teilstudie KK 1 ist unter dem Arbeitsablaufabschnitt "Sonstiges" das Wechseln der Lagerbehälter (z. B. Kisten, Gitterboxen oder ein Anhänger) oder das Beibringen entfernt liegender Rundhölzer gemeint. "Extra Spalten" wurde vom Aufnehmer bei den Teilstudien KK 3 und KK 4 immer dann notiert, wenn die Arbeitskraft vom Bedienpult hin zum Spalten lief, um dort entweder das Holz zurechtzurücken oder es wegen des schon auf 33 cm gekürzten Ausgangmaterials direkt nur von der Seite vor den Stempel einzulegen, um ohne Sägen zu Spalten. Dies wurde hauptsächlich mit Rundlingen größerer Durchmesser durchgeführt. Bei einer Optimierung des gesamten Arbeitsablaufes sollte dieser Vorgang jedoch vermieden werden, so dass zu den Teilstudien KK 3 und KK 4 ein großes Potential zur Verbesserung der Arbeitsabläufe und zur der Steigerung der technischen Arbeitsproduktivität besteht. Dagegen war die Arbeitsgestaltung in Teilstudie KK 2 als optimal anzusehen, denn 94 % des Arbeitsablaufs diente mit "Sägen" und "Vorschub" direkt der Scheitholzproduktion (Abbildung 69).

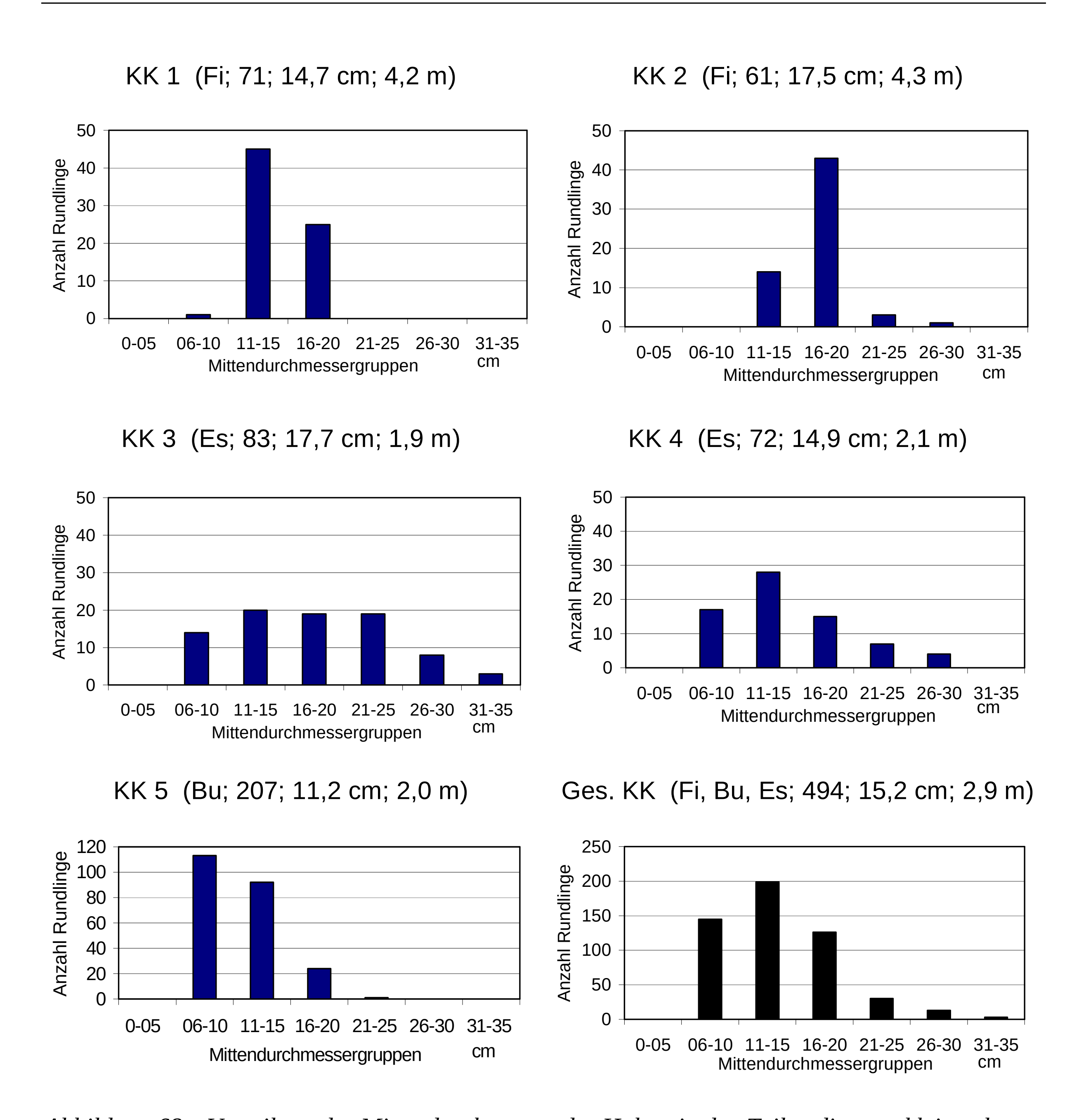


Abbildung 68: Verteilung der Mittendurchmesser des Holzes in den Teilstudien zur kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK). Grafiktitel mit Baumart, Anzahl Rundhölzer, mittlerem Mittendurchmesser und mittlerer Länge

Das Fördern des Rundholzes wurde zum großen Teil parallel zur Bearbeitung des vorherigen Holzes durchgeführt, so dass es nur dann notiert wurde wenn die Arbeitskraft ausschließlich Rundholz förderte. Dieser Vorgang betrug aber insgesamt nur 4 % des Arbeitsablaufes. Das Sägen und der Vorschub benötigten mit 46 % bzw. 48 % maschinell bedingt annähernd gleich viel Zeit. Das Spalten erfolgte automatisch nach bzw. während des Sägevorgangs und wurde nicht extra notiert. Auch in der Teilstudie KK 5 waren die Arbeitsabläufe annähernd optimal gestaltet. Zusammenfassend bestand bei den Teilstudien KK 1, KK 3 und KK 4 ein Optimierungspotenzial, denn das Fördern nahm bei KK 1 einen zu großen Anteil ein, während bei KK 3 und KK 4 der Anteil des "Sägens" von 20 % auf annähernd 50 % hätte erhöht werden können.

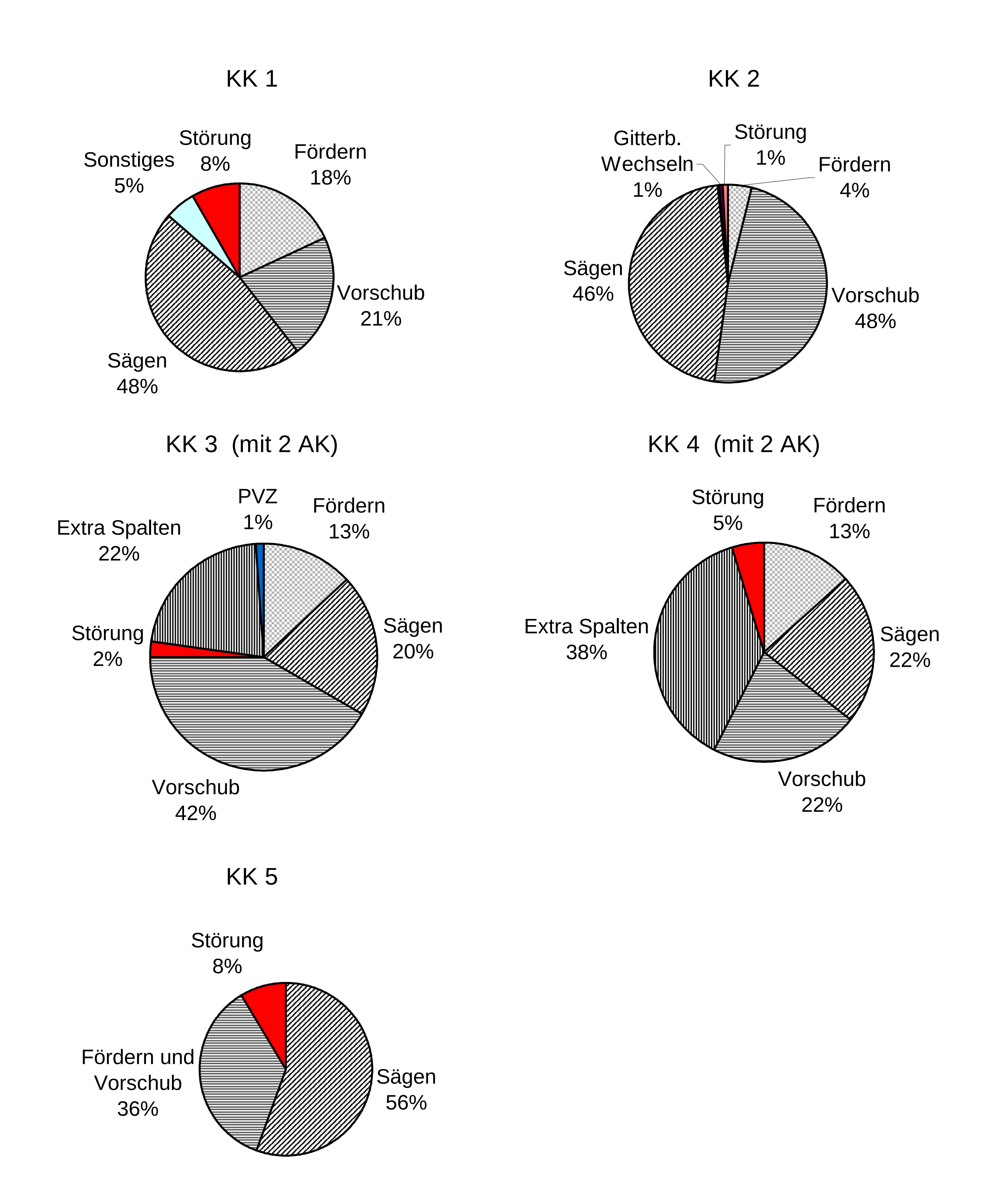


Abbildung 69: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in Teilstudien mit der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK). Für KK 2 und 5 wurden Rohdaten einer früheren Untersuchung der LWF ausgewertet (Daten zu MALL [41])

Ein Vergleich der Zyklusdauer ist wegen der unterschiedlichen Rundholzlängen hier nicht sinnvoll, die Auswertungen beziehen sich daher nur auf die technische Arbeitsproduktivität (Abbildung 70). Bei den Teilstudien KK 1 und KK 2 waren unterschiedliche Probanden am selben Gerät im Einsatz. Hierbei wird der Unterschied eines Probanden, der professionell arbeitet

(KK 2) zu einem, der das Verarbeiten zu Brennholz nur im Nebenerwerb betreibt (KK 1, Proband ist im Hauptberuf Zimmermann) verdeutlicht. Die durchschnittliche TAP ist mit 5,3 Fm/AKh (KK 1) zu 2,6 Fm/AKh (KK 2) verdoppelt. Der Grund für diesen Unterschied ist neben dem etwas besseren Ausgangsortiments (größere Mittendurchmesser, vgl. Abbildung 68) vor allem in der bessere Gestaltung des Arbeitsablaufes zu suchen (vgl. Abbildung 69). Letzteres gilt auch für die Teilstudien KK 3 und KK 4, welche mit einer mittleren TAP von 1,9 Fm/AKh (KK 3) und 2,5 Fm/AKh (KK 4) weit unter den Möglichkeiten der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschinen bleiben. Dies liegt aber auch am mobilen Bearbeitungsstandort, der in KK 3 und KK 4 im Wald an einer Forststraße lag. Im Unterschied dazu ist der Arbeitsablauf in Teilstudie KK 5 annähernd optimal gestaltet (vgl. Abbildung 69). Lediglich das mit einem mittleren Mittendurchmesser von 11,2 cm zu klein dimensionierte Ausgangsmaterial (vgl. Abbildung 68) führt in Teilstudie KK 5 zu einer verringerten TAP von nur 2,2 Fm/AKh (Tabelle 13). Das beste Ausgangssortiment ist demnach für das Arbeiten mit kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschinen das größtmögliche, es liegt bei ca. 25 bis 30 cm Mittendurchmesser. Diese Rückschluss basiert vor allem auf den Ergebnissen der Teilstudien KK 2 und KK 5, da in denen professionell gearbeitet wurde.

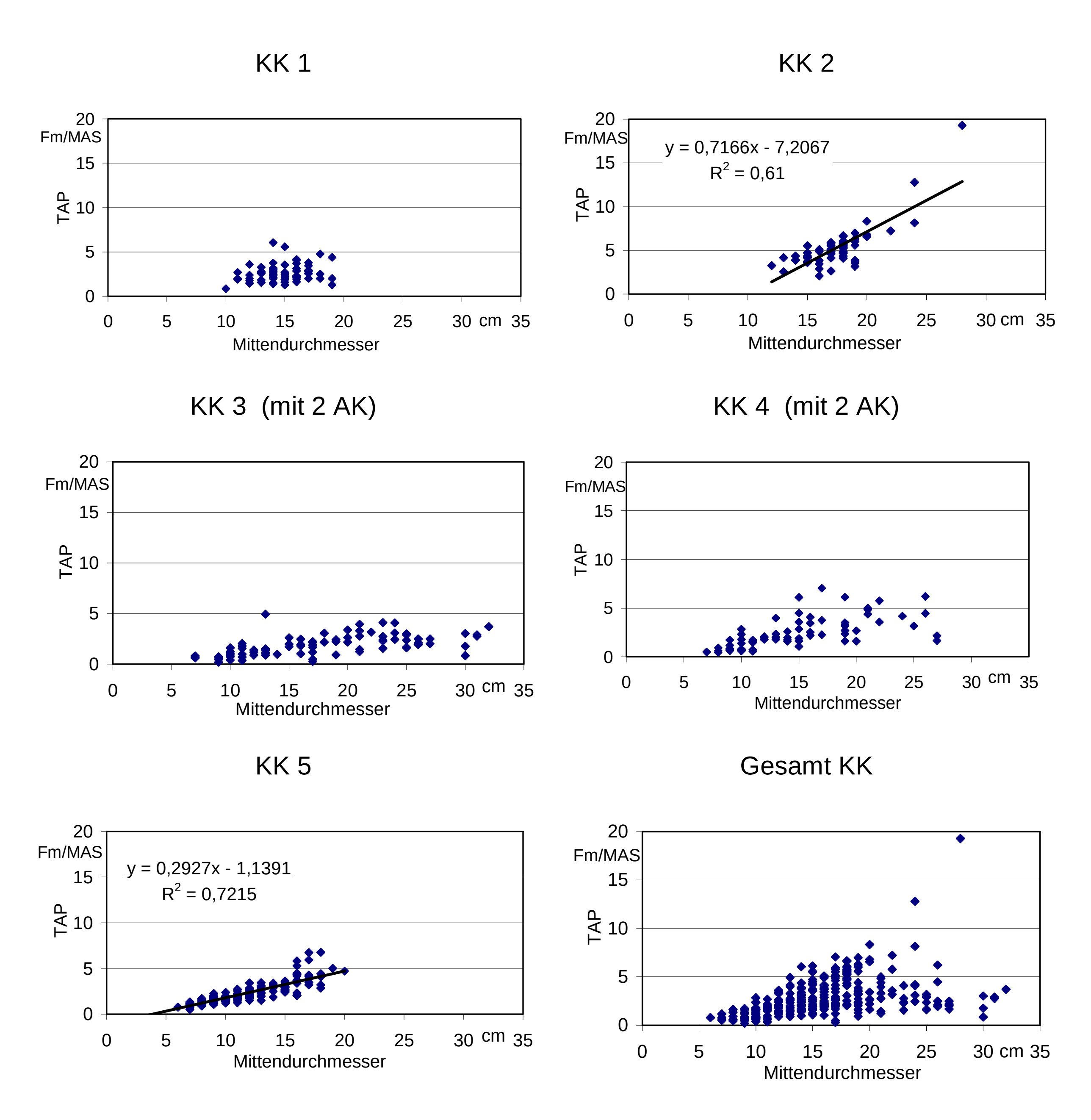


Abbildung 70: Technische Arbeitsproduktivität (TAP) je Maschinenstunde beim Einsatz der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK) in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge. AK Arbeitskräfte

Die Produktivität des Maschineneinsatzes der einzelnen Teilstudien KK 1 bis 5 mit den berechneten Produktivitäten bezogen auf die Anzahl der beteiligten Arbeitskräfte ist in Tabelle 13 wiedergegeben. Die TAP ist gegenüber den GS-Studien zum großen Senkrechtspalter mit 2,8 Rm/AKh und den WS-Studien zum großen Waagerechtspalter mit 2,7 Rm/AKh auf 3,9 Rm/AKh pro beteiligter Arbeitskraft gestiegen.

Tabelle 13: Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) des Maschinen- und Arbeitskräfteeinsatzes und mittlere Zyklusdauer beim Einsatz der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK-Studie). Berechnung der TAP je Maschinenarbeitsstunde MAS bzw. Arbeitskraftstunde AKh aus Gesamtholzmenge und Gesamtarbeitszeit GAZ, d. h. ggf. inklusive Rüst-, Stör- und Verteilzeiten

Teil-studie	Baumart	Mittlere Zyklusdauer [s]	Technische Arbeitsproduktivität (TAP) des Maschineneinsatzes		Technische Arbeitsproduktivität (TAP) des Arbeitskrafteinsatzes	
			TAP [Fm/MAS]	TAP [Rm/MAS][a]	TAP [Fm/AKh]	TAP [Rm/AKh][a]
KK 1	Fichte	107,6	2,6	4,0	2,6	4,0
KK 2	Fichte	75,0	5,3	8,2	5,3	8,2
KK 3	Esche	98,0	1,9	3,1	1,0[b]	1,6[b]
KK 4	Esche	59,7	2,5	4,0	1,3[b]	2,0[b]
KK 5	Buche	57,8	2,2	3,5	2,2	3,5
Mittelwert		79,62	2,9	4,6	2,5	3,9

[a] Umrechnung von Fm zu Rm nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.6.1); hier: Rm mit 33 cm Scheiten, gestapelt. Bei Esche wurden der Umrechnungsfaktor für Buche verwendet.

[b] Hier waren zwei Arbeitskräfte (AK) eingesetzt worden, die TAP wurde auf 1 AKh umgerechnet.

5.2.6 Sägen und Spalten mit der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine

Beim Sägen und Spalten mit der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine (GK) arbeitet in der Regel nur eine Person an dem Gerät, der Maschinist (Abbildung 71). Auch die vorliegenden Messungen wurden so durchgeführt. Bei den Probanden handelte es sich um professionelle Arbeiter.



Abbildung 71: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine (GK). Hier: Herkules II, Fa. Kretzer

In drei Teilstudien GK 1, 2 und 3 wurde das gleichzeitige Ablängen und Spalten zu 33 cm Scheiten von insgesamt 197 Rundhölzern der Baumart Buche (Fagus sylvatica) mit einer durchschnittlichen Länge von 6,2 m über insgesamt 10:31 h untersucht. Es wurden zwei verschiedene Geräte der Firmen S&Ü und Kretzer eingesetzt. Die Maschinen und Rahmenbedingungen zu den Messungen sind in Anhang 11.1 in Steckbriefform zusammengestellt.

Mit einem mittleren Mittendurchmesser von 25,9 cm weist das hier verwendete Rohsortiment erwartungsgemäß die größte Holzstärke aller Studien auf. Am häufigsten ist das Rundholz mit Mittendurchmessern von 21 bis 25 cm (Abbildung 72). Unter 16 cm wird kein Rundholz verwendet, die maximale Stärke liegt bei 45 cm. Während der maximale Mittendurchmesser bei den Studien GK 1 und GK 2 maschinenbedingt noch auf 35 cm begrenzt ist, kann die Maschine in der Studie GK 3 auch Durchmesser bis 65 cm verarbeiten.

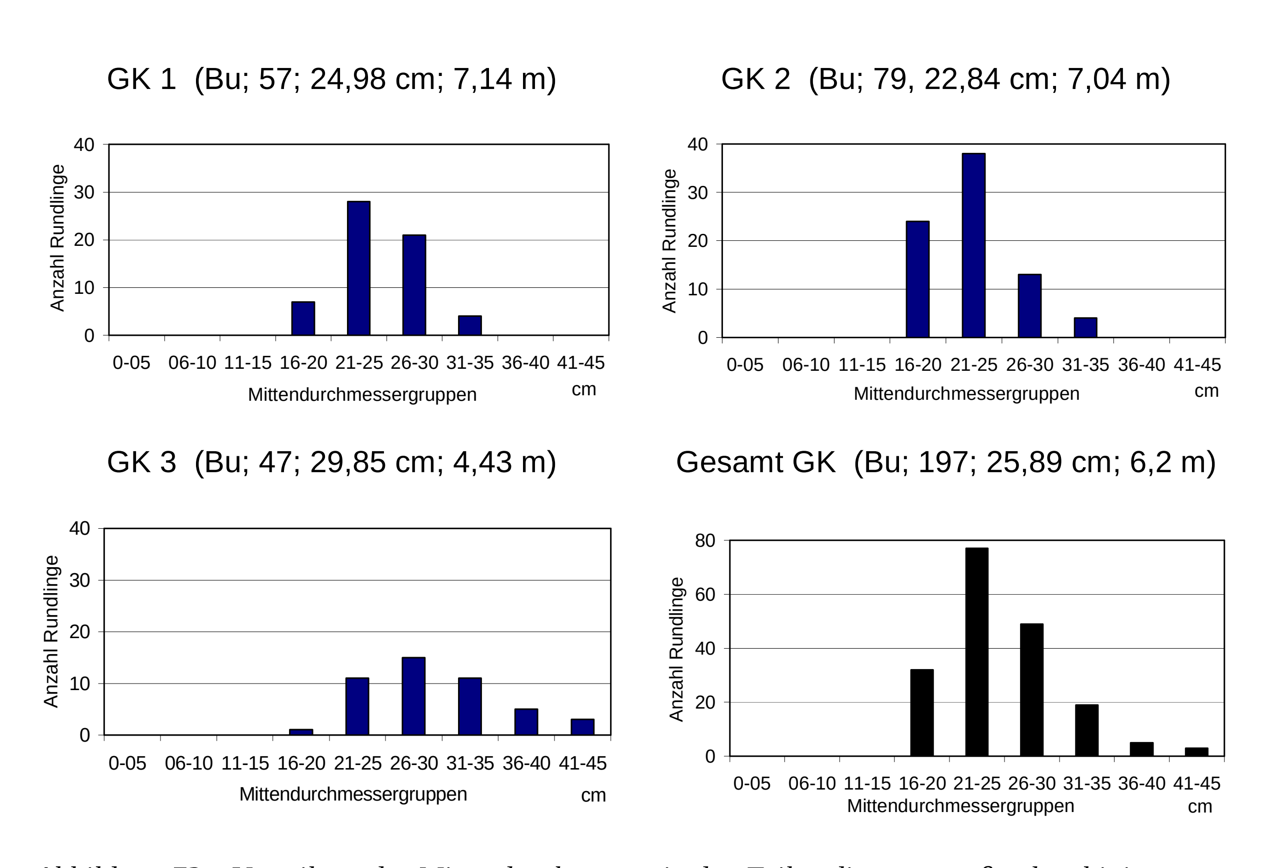


Abbildung 72: Verteilung der Mittendurchmesser in den Teilstudien zur großen kombinierten Säge-Spaltmaschine (GK). Grafiktitel mit Baumart, Anzahl der Rundhölzer, mittlerem Mittendurchmesser und mittlerer Länge

Im Vergleich zu den Messungen an kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschinen (KK) nehmen die Störungen bei den großen Maschinen (GK) auf zum Teil bis zu 20 % Anteil erkennbar zu (Abbildung 73). Offenbar wirken sich hier die hohen Materialbelastungen und die erschwerte Handhabbarkeit des Rohmaterials infolge der großen Holzdurchmesser und -längen aus. Hier besteht offenbar noch Potenzial für technische Verbesserungen zur Reduzierung der Störanfälligkeit. In der Teilstudie GK 2 waren derartige Verbesserungen bereits realisiert, diese Messungen erfolgten ca. 1 Jahr nach der Teilstudie GK 1, die mit demselben Probanden an derselben leicht verän-

derten Maschine durchgeführt worden war. Die Verbesserungen führen zu einer Verringerung der Störungen von 18 % auf 5 %. Zusätzlich gelang es in GK 1 die Lagerbehälter des fertig gespaltenen Scheitholzes während des Betriebs auszutauschen, so dass dieser Vorgang nicht mehr als eigener Arbeitsablaufabschnitt auftaucht. Alle Verbesserungen bewirkten eine Steigerung der Leistung. Weitere Steigerungen sind möglich, z. B. könnten die Anteile für "Fördern" (7 % und 8 %) bei einem optimalen Ablauf auf nahezu 0 % gesenkt werden, da dieser Abschnitt nur dann notiert wurde, wenn die Maschine ausschließlich mit Fördern, d. h. dem Zuführen des Rundholzes vom Vorratsgestänge auf das Förderband, beschäftigt war.

In der Teilstudie GK 3 gelang es dahingegen, diesen Anteil auf nur 2 % Anteil zu reduzieren, indem beinahe jedes Rundholz parallel zur Bearbeitung des vorhergehenden Rundholzes auf das zuführende Förderband bewegt werden konnte. Dennoch sind die Arbeitsabläufe auch bei dieser Teilstudie nicht als optimal zu bezeichnen, da die Anteile von "Störung" und "Sonstiges" noch zu hoch sind. Unter "Störung" fällt hier z. B. ein zu geringer Anpressdruck und somit uneffektives Sägen oder ein Zurechtrücken des bereits abgelängten Teilrundlings vor dem Pressen durch das Spaltkreuz. Unter "Sonstiges" wurde z. B. die Verlagerung des abführenden Förderbandes zum nächsten freien Lagerplatz oder das Beladen des Vorratsgestells mit neuem Rundholz notiert.

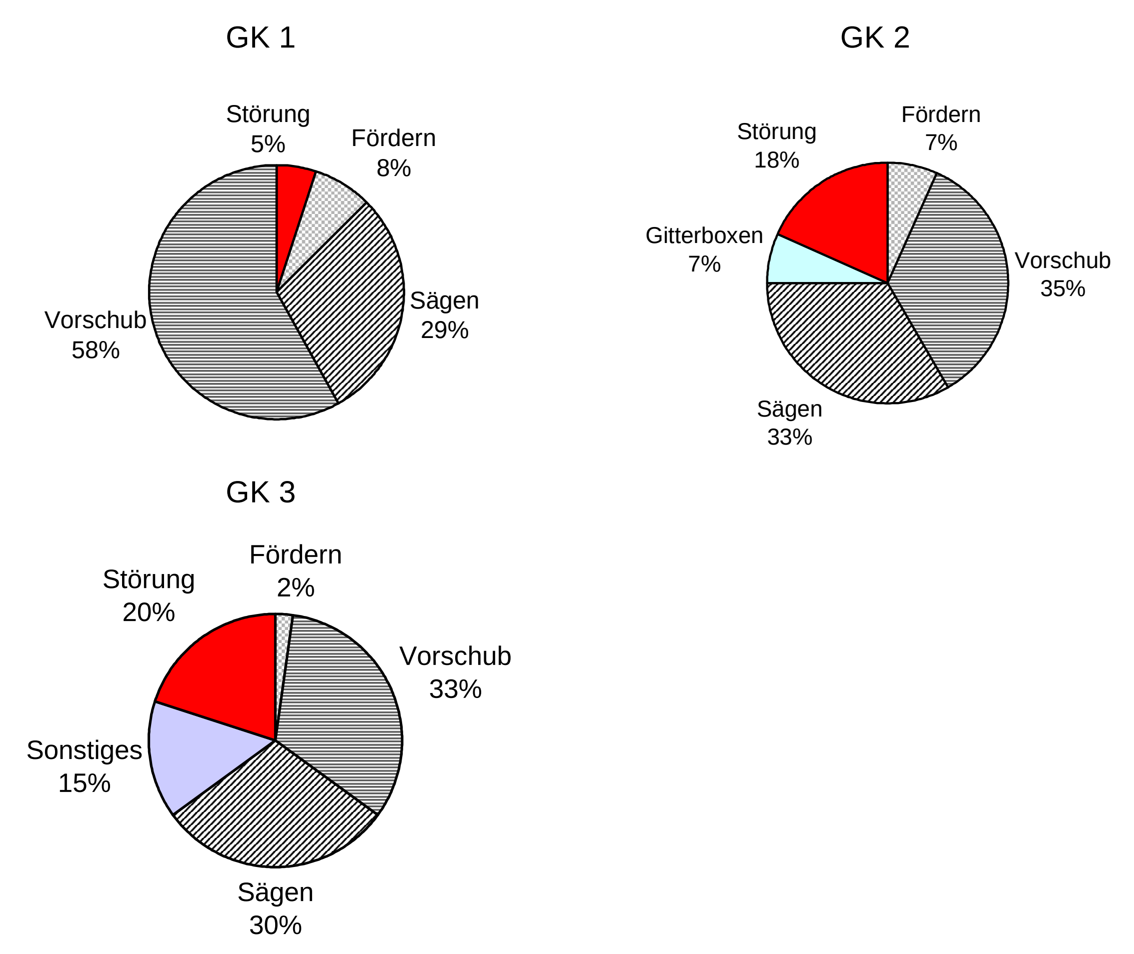


Abbildung 73: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in den Teilstudien mit großen kombinierten Säge-Spaltmaschinen (GK). Zur Teilstudie GK 3 wurden Rohdaten einer früheren Untersuchung der LWF ausgewertet (Daten zu MALL [41])

In den Teilstudien GK 1 bis GK 3 ist eine klare Leistungsabhängigkeit zum Mittendurchmesser des Rohholzes zu erkennen, das zeigt Abbildung 74. Das optimale Sortiment für das Arbeiten mit den großen kombinierten Säge-Spaltmaschinen ist das größtmögliche. Maximals wurde somit in Teilstudie GK 1 bei einem Mittendurchmesser von 35 cm eine "momentane" Produktivität von über 12 Fm pro Maschinenarbeitsstunde (MAS) festgestellt. Bei kleinen Mittendurchmessern von ca. 20 cm sinkt die Produktivität auf nur noch ca. 4 Fm/MAS. Bei einem Sortiment mit Rundholz von 30 cm Stärke kann die Produktivitätsschwankung je nach Maschine und Einstellung mehr als 5 Fm/MAS betragen (siehe Gesamt GK, Abbildung 74).

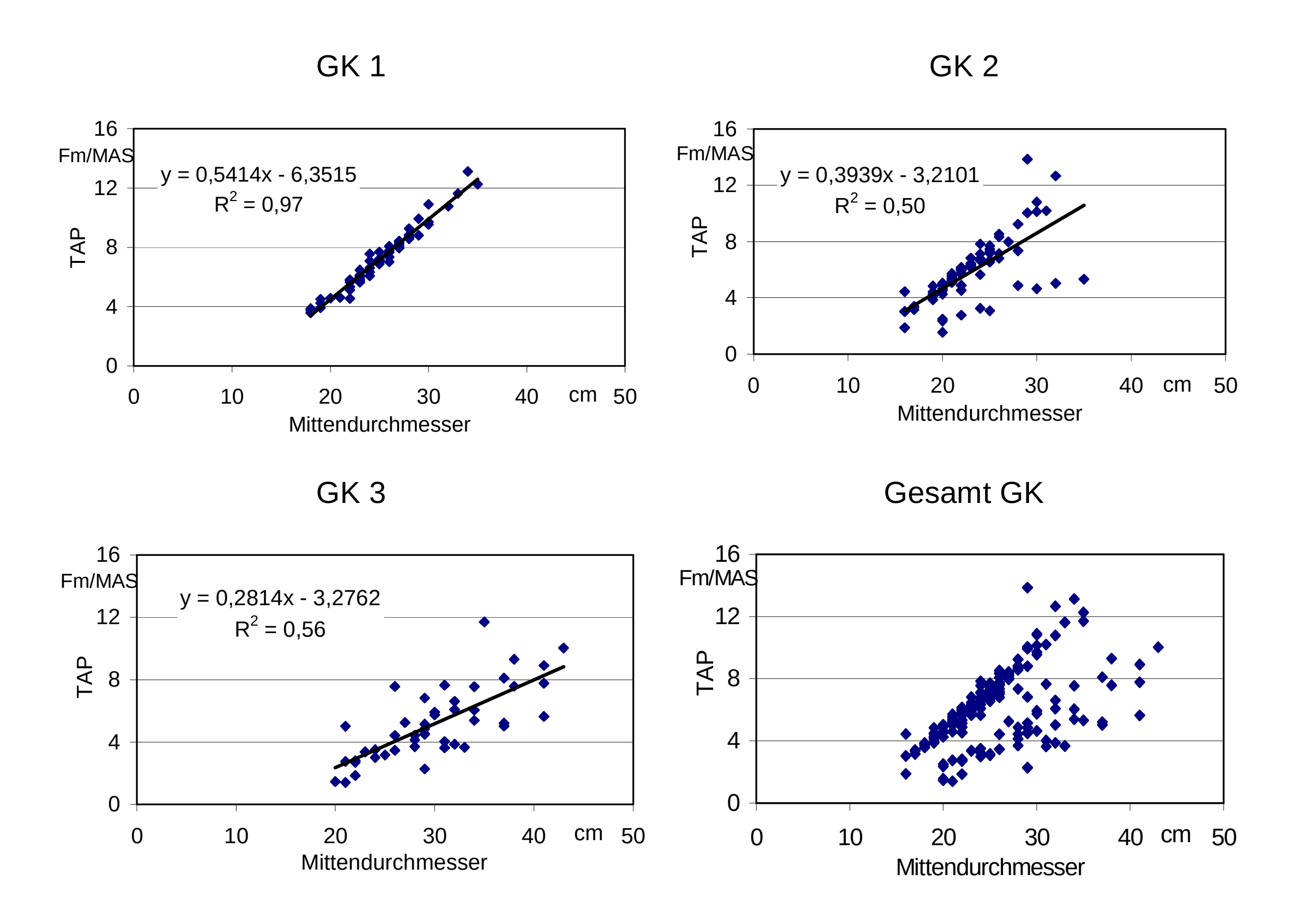


Abbildung 74: Technische Arbeitsproduktivität (TAP) je Maschinenstunde beim Einsatz der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine (GK) in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge. AK Arbeitskräfte

Die mittlere technische Arbeitsproduktivität (TAP) in den einzelnen Teilstudien GK 1 bis GK 3 und die mittlere Zyklusdauer sind in Tabelle 14 wiedergegeben. Gegenüber der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK) ist die mittlere TAP von 2,5 Fm/MAS auf 6,0 Fm/MAS angestiegen. Innerhalb der Teilstudien war die Zyklusdauer wegen der unterschiedlichen Rohholzlängen stark variabel, daher bietet die Angabe der mittleren Zyklusdauer in Tabelle 14 hier nur einen ungefähren Anhaltswert.

Tabelle 14: Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) des Maschineneinsatzes und mittlere Zyklusdauer beim Einsatz der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine (GK-Studie). Berechnung der TAP je Maschinenarbeitsstunde (MAS) aus Gesamtholzmenge und Gesamtarbeitszeit GAZ, d. h. ggf. inklusive Rüst-, Stör- und Verteilzeiten. Eine MAS entspricht hier einer AKh.

Teilstudie	Baumart	Mittlere Zyklusdauer [s]	TAP [Fm/MAS]	TAP [Rm/MAS][a]	TAP [SRm/MAS][a]
GK 1	Buche	260	7,2	11,6	17,1
GK 2	Buche	200	5,8	9,3	13,8
GK 3	Buche	303	5,1	8,2	12,1
	Mittelwert	254,3	6,0	9,7	14,3

[a] Umrechnung von Fm zu Rm bzw. SRm nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.6.1); hier: Rm bzw. SRm mit 33 cm Scheiten

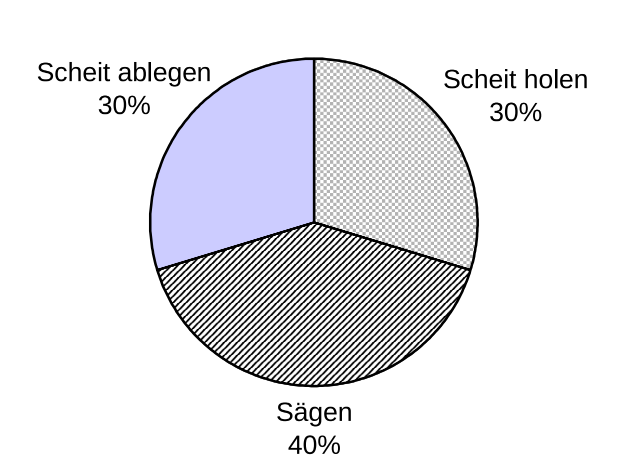
5.2.7 Trennschnitte mit der Brennholz-Kreissäge

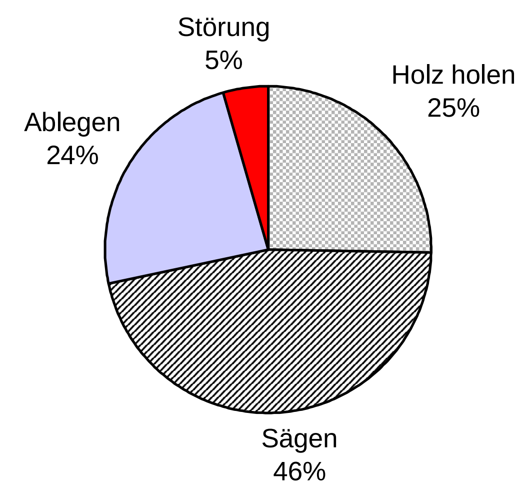
Für die Studie "Trennschnitte mit der Brennholz-Kreissäge (KR)" wurde in fünf Teilstudien KR 1 bis KR 5 das Ablängen zu 33 cm Stücken von insgesamt 205 Rundhölzern und 960 bereits gespaltenen Scheiten der Baumart Fichte (Picea abies) und Buche (Fagus sylvatica) mit einer Länge von 1,0 m in insgesamt 5:42 h untersucht. Hierbei wurde nur eine einzelne Arbeitskraft benötigt. Bei den hier eingesetzten Probanden handelte es sich um einen jungen Landwirt und einen jungen Diplom Forstwirt, beide sind als semi-professionell arbeitend einzustufen. Die Maschinen und Rahmenbedingungen zu den Messungen sind in Anhang 11.1 in Steckbriefform zusammengestellt.

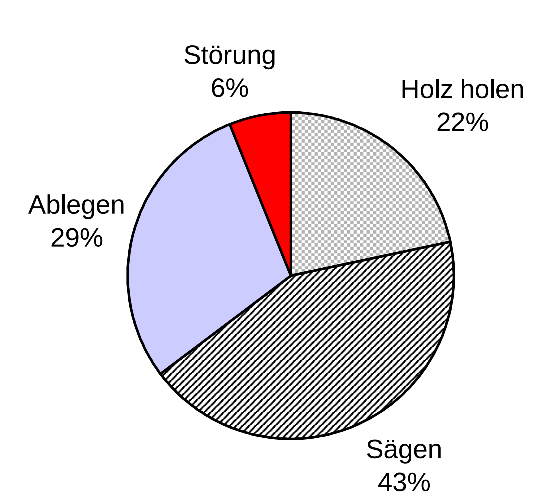


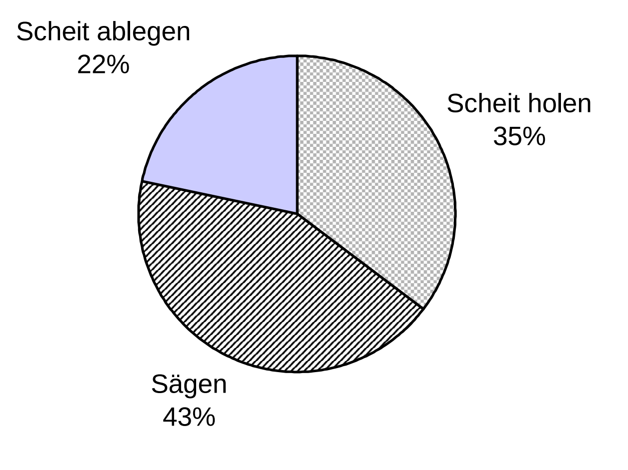
Abbildung 75: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Trennschnitt mit der Kreissäge (KR). Hier: WK 771, Fa. BGU

Im Ergebnis zeigt sich, dass der Anteil des "Sägens" ca. 40 bis 46 % des gesamten Arbeitsablaufs ausmacht (Abbildung 76). Die übrige Arbeitszeit wird zu etwa gleichen Teilen für "Holz holen" und "Holz ablegen" benötigt, je nach Standort der Lager. Wenn nicht gespaltene Scheite sondern Rundlinge abgelängt werden, kommt es hin und wieder zu einem Verklemmen des Sägeblatts, hierdurch sind die mit 5 % bei KR 2 und mit 6 % bei KR 3 zu Buche schlagenden "Störungen" zu erklären.









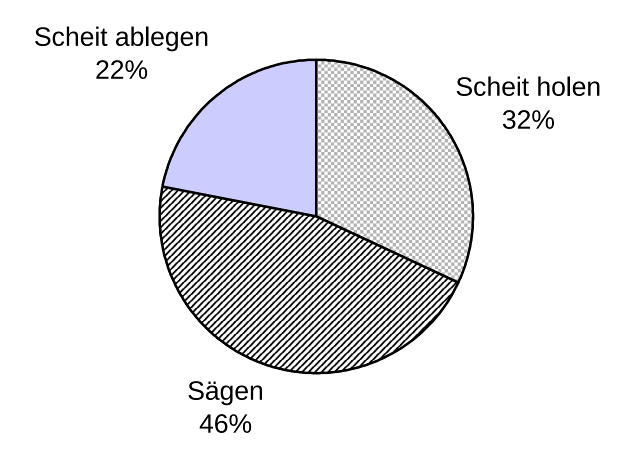


Abbildung 76: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in den 5 Teilstudien zum "Trennschnitt mit der Brennholz-Kreissäge" (KR). Grafiktitel mit Baumart, Anzahl der Meterhölzer, ggf. mittlerem Mittendurchmesser (bei Rundlingen) und Aufbereitungsform

Die mittlere technische Arbeitsproduktivität (TAP) und die mittlere Zyklusdauer in den einzelnen Teilstudien KR 1 bis KR 5 sind in Tabelle 15 wiedergegeben. Unabhängig davon, ob Rundlinge oder gespaltene Scheite gesägt werden, liegt die mittlere TAP bei durchschnittlich 4,1 SRm/AKh. Offenbar wird bei den Rundlingen der Vorteil der größeren Durchmesser durch den Nachteil der höheren Störanfälligkeit (Verklemmen des Sägeblattes) und der somit deutlich längeren Zykluszeit je Meterholz kompensiert. Unterschiede bestehen zwischen den Holzarten. Bei der schwereren und härteren Buche wird durchschnittlich eine TAP von 3,3 SRm/MAS erreicht, wohingegen die TAP bei der Fichte bei durchschnittlich 4,6 SRm/MAS liegt .

Tabelle 15: Mittlere technische Arbeitsproduktivität (TAP) des Maschineneinsatzes beim Ablängen mit der Brennholz-Kreissäge. Berechnung der TAP je Maschinenarbeitsstunde (MAS) aus Gesamtholzmenge und Gesamtarbeitszeit GAZ, d. h. ggf. inklusive Rüst-, Stör- und Verteilzeiten . Eine MAS entspricht hier einer AKh.

Teilstudie	Baumart/Aufbereitung	Mittlere Zyklusdauer [s]	TAP [Fm/MAS]	TAP [Rm/MAS][a]	TAP [SRm/MAS][a]
KR 1	Fichte, gespalten	14,3	-	2,9	4,7
KR 2	Fichte, ungespalten	25,1	1,7	-	4,3
KR 3	Buche, ungespalten	31,9	1,4	-	3,3
KR 4	Fichte, gespalten	14,0	-	3,0	4,9
KR 5	Buche, gespalten	15,6	-	2,2	3,3
	Mittelwert		1,6	2,7	4,1

[a] Umrechnung von Fm zu Rm bzw. SRm nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.6.1); hier: Rm bzw. SRm mit 33 cm Scheiten

5.2.8 Schichten und Laden von Scheitholz

Das Schichten und Laden des Scheitholzes wurde in vier Teilstudien SC 1 bis 4 über insgesamt 9:03 h untersucht. Die Teilstudien umfassen das Schichten mit Bündelhilfe zu 0,5 Rm bzw. 1 Rm großen Rundbündeln (SC 1 und SC 2, vgl. Abbildung 78), das Schichten ohne Bündelhilfe (SC 3) sowie das Befüllen von Gitterboxen (SC 4). In Tabelle 16 sind die hierzu gemessenen Verfahren und die dafür berechneten Gesamtproduktivitäten zusammengestellt. Die Berechnung einer mittleren TAP ist wegen der untereinander nicht vergleichbaren Verfahren nicht sinnvoll. Die Geräte und Rahmenbedingungen zu den Messungen sind in Anhang 11.1 in Steckbriefform zusammengestellt.



Abbildung 77: Arbeitsplatzbeispiel für das Stapeln und Bündeln mit einer Bündelhilfe, hier für 0,5 Rm-Bündel

Tabelle 16: Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) beim Scheitholz-Schichten und -laden in verschiedenen Lagerformen (SC-Studien)

Teil-studie	Standort	Verfahren	Baumart und Scheitlänge	TAP [Rm/AKh]	TAP [SRm/AKh]
SC 1	Hofstelle	Bündeln mit Bündelhilfe zu 0,5 Rm Rundbündel	Buche und Fichte / 1 m	2,3[a]	–
SC 2	Lagerhalle	Bündeln mit Bündelhilfe zu 1 Rm Rundbündel	Buche und Fichte / 1 m	3,7	–
SC 3	Betriebs-gelände	Schichten von 33 cm Scheiten ohne Bündelhilfe	Buche und Fichte / 33 cm	3,0	–
SC 4	Betriebs-gelände	händisches Befüllen einer 2 m hohen Gitterbox	Buche und Fichte / 33 cm	–	4,6

[a] Hier waren zwei Arbeitskräfte (AK) eingesetzt worden, die TAP wurde auf 1 AKh umgerechnet.

In den Studien SC 1 und SC 2 (Schichten mit Bündelhilfe) wurden neben der Gesamtproduktivität auch die einzelnen Anteile der Arbeitsablaufabschnitte aufgenommen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 78 dargestellt. In der Studie SC 1 waren zwei Arbeitskräfte gleichzeitig mit der Bünde-

lung von Meterscheiten zu 0,5 Rm Rundbündeln beschäftigt. Da die Bündelhilfe erst nach dem Zusammenzurren und Binden des Bündels wieder weiterverwendet werden kann, ergibt es sich, dass eine Arbeitskraft während des Bindens auf die andere Arbeitskraft bis zum Kippen des vollständigen Bündels aus dem Rahmen warten muss, wodurch dieser Ablaufabschnitt mit relativ unproduktiven Wartezeiten verbunden ist. Hier wäre eine weitere Bündelhilfe hilfreich, um auch die zweite Arbeitskraft voll auszulasten, denn so wurde auf das eigentliche Stapeln in Studie SC 1 nur 38 % der gesamten Arbeitszeit verwendet. In Studie SC 2 fallen diese Wartezeiten weg, da nur eine einzige Arbeitskraft eingesetzt wurde. Da zudem größere Bündel von 1 Rm erstellt wurden, steigt der Anteil für das Stapeln auf 60 % der Arbeitszeit. Die Produktivität steigert sich dadurch von 2,3 auf 3,7 Rm/AKh. Der Arbeitsablaufabschnitt "Kippen" wird in der Studie SC 1 nicht extra aufgeführt und ist im Abschnitt "Ortswechsel" mit enthalten.

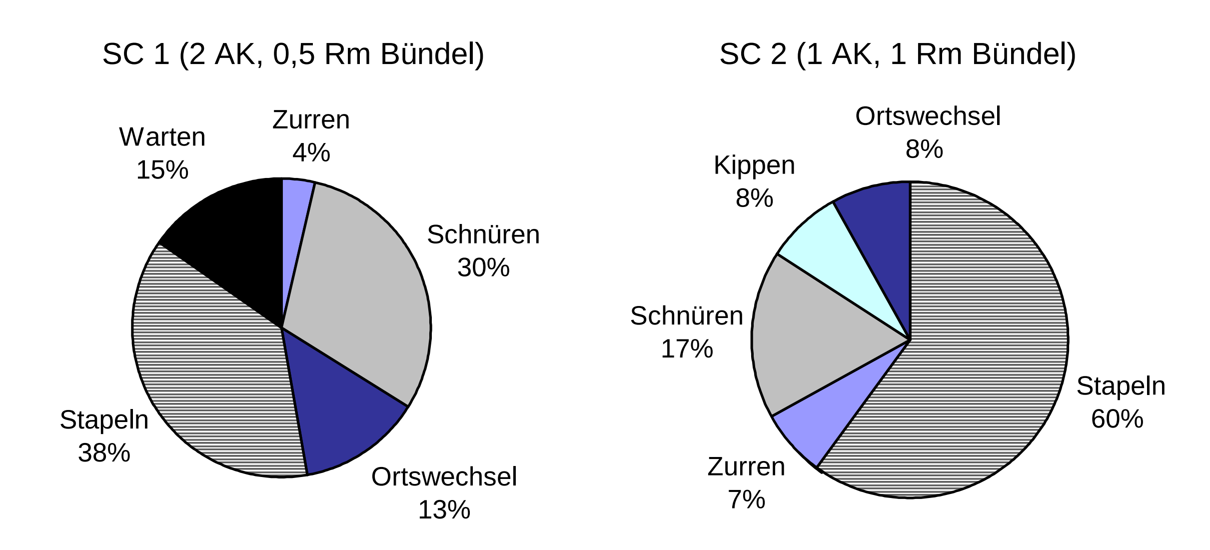


Abbildung 78: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte beim Schichten mit Bündelhilfe (Teilstudien SC 1 und 2). AK Arbeitskraft

5.2.9 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Brennholzaufbereitung

Typische Sortimente. Die hier vorgestellten Ergebnisse sind vor dem Hintergrund der üblichen Schwankungen beim verwendeten Ausgangssortiment (vor allem Durchmesser) nicht immer vollständig miteinander vergleichbar. Zwar war es das Ziel, die betrachteten Werkzeuge oder Maschinen unter den für sie typischen Einsatzbedingungen zu bewerten, allerdings war hierbei auch die natürliche oder zufällige Variabilität der Durchmesser in Kauf zu nehmen. Tendenziell kann aber festgestellt werden, dass mit zunehmendem Mechanisierungsgrad auch die Durchmesser zunehmen, was die üblichen Praxiseinsatzbedingungen in etwa zutreffend widerspiegelt. Eine Ausnahme bildet lediglich das "Spalten mit dem Spalthammer". Bei dem hierfür verwendeten Rohholz war das Ausgangssortiment mit einem mittleren Mittendurchmesser von 17,9 cm für die manuelle Zerkleinerung überdurchschnittlich stark.

Eine Übersicht über die mittleren Mittendurchmesser der jeweiligen Teilstudien bietet Tabelle 17. Dabei fällt auf, dass die Sortimentstärke vom kleinen zum großen Spalter (senkrecht oder waagerecht) von ca. 12 auf ca. 20 cm steigt, was den üblichen Verwendungsbereich der großen Spalter

für weniger handliche Holzstärken unterstreicht. Bei den kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschinen ist der mittlere Mittendurchmesser mit ca. 15 cm wieder etwas geringer, was wegen der häufigen Verwendung längerer Holzstangen (hier ca. 3 m), beispielsweise aus der Jungdurchforstung, ebenfalls plausibel und praxisüblich erscheint. Passend zur hohen Durchsatzleistung wird dagegen bei den großen kombinierten Säge-Spaltmaschinen mit ca. 26 cm mittlerem Mittendurchmesser das stärkste Ausgangssortiment eingesetzt. Auch hier erscheint eine Verallgemeinerung der Ergebnisse angesichts der für das Verfahren erforderlichen rationellen und hochmechanisierten Bereitstellungskette für ganze Schaftrohlinge ebenfalls zulässig.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die hier gewählte, zum Teil unterschiedliche, Rohstoffbasis als relevant und praxisgerecht anzusehen ist. Eine für alle Messungen einheitliche Sortimentsauswahl hätte zwar methodisch unzweifelhaft eine bessere direkte Vergleichbarkeit der Messergebnisse ermöglicht, jedoch wäre die Untersuchung dadurch den spezifischen besonderen Einsatzbedingungen der einzelnen Verfahren nicht gerecht geworden und hätte die Beurteilung typischer Verfahrensketten (vgl. Kapitel 1) in Frage gestellt.

Produktivität. Wie erwartet ist die Produktivität bei der Arbeit mit dem Spalthammer mit 0,12 (Buche) bzw. 0,43 Fm/AKh (Fichte) unter allen Verfahrensalternativen am niedrigsten, zumal hier auch – wie erwähnt – im Fall der Buche weniger typisches Ausgangsmaterial verwendet worden war. Bei Fichtenholz waren die Holzstärken für den Spalthammer dagegen mit denen der Kleine-Senkrechtspalterstudien vergleichbar. Daher kann hier auch die Aussage getroffen werden, dass die Produktivität sich zumindest beim kurzzeitigen Einsatz nicht wesentlich unterscheidet. Allerdings bietet eine hydraulische Spalthilfe im Unterschied zur Axt oder zum Spalthammer neben den Sicherheitsvorteilen und der verbesserten Arbeitsschwere (vgl. hierzu Kapitel 5.3) auch eine höhere Leistungskonstanz.

Die Produktivität eines großen Senkrechtspalters liegt mit 1,36 Fm/AKh (Buche) bzw. 1,62 Fm/AKh (Fichte) schon um ein Mehrfaches über dem des kleinen Spalters, das zeigt die zusammenfassende Tabelle 17, in der für eine bessere Verwendung der Ergebnisse auch die Produktivität in der Einheit der Vermarktungssortimente Schichtholz (Rm) und geschüttete Scheite (SRm) angegeben wird. Auch die Arbeit mit dem Waagerechtspalter unterscheidet sich dabei in der Größenordnung nicht vom großen Senkrechtspalter (1,48 Fm/AKh, Fichte).

Zu berücksichtigen ist bei diesen Leistungsvergleichen allerdings, dass das Holz im Vergleich zum kleinen Spalter noch eine Länge von einem Meter hat. Ein Meterscheit hat ungefähr das dreifache Volumen eines kurzen Scheites (33 cm), folglich erhöht sich die Leistung bei den großen Spaltern auch entsprechend. Das Ablängen (Sägen) der so entstandenen langen Scheite erfordert noch einmal etwa den gleichen Aufwand wie das Spalten selbst (Tabelle 17). Ein direkter Vergleich der Aufbereitungsverfahren ist somit nur durch Aggregierung der Teilleistungen in einer vollständigen Prozesskette zulässig, derartige Betrachtungen finden sich in Kapitel 6.2.2.

Für das anschließende Aufschichten der gespaltenen 33 cm-Scheite (ohne Bündelhilfe) ist bei beiden Holzarten eine technische Arbeitsproduktivität (TAP) von 2,98 Rm/AKh anzusetzen, das entspricht umgerechnet 1,9 Fm/AKh. Größere Holzartenunterschiede von 1,36 bis 3,90 Fm/AKh (Buche und Fichte) ergeben sich dagegen bei den kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschinen. Hier zeigt sich, dass die Bearbeitung der Fichte aufgrund ihrer geringeren Rohdichte tatsächlich

Vorteile bietet, diese zeigen sich in der höheren Vorschubgeschwindigkeit und der geringeren Störanfälligkeit verglichen mit Buche. Der verhältnismäßig große Unterschied ist jedoch zusätzlich noch auf den unterschiedlichen Leistungsgrad der Probanden sowie auf das bei den Hartholzversuchen im Wald fehlende Gestell zum einfachen Abrollen des Rundholzes auf das Förderband und auf die ungünstigen Standortbedingungen im Wald (beengt, der Witterung voll ausgesetzt, weicher unebener Boden, schlechte Lichtverhältnisse) zurückzuführen. Die Versuche mit Fichtenholz erfolgten dagegen auf einem befestigten Aufarbeitungsplatz.

Einen weiteren Produktivitätssprung ermöglichen die großen kombinierten Säge-Spaltmaschinen, bei denen hier nur die Verarbeitung von Buche untersucht wurde, da Laubholz das überwiegend eingesetzte Ausgangsmaterial für diese Maschinen darstellt. Da der hier festgestellte Messwert von ca. 6,03 Fm/AKh einen Mittelwert aus drei Untersuchungen darstellt und die verwendeten Maschinen z.T. während des Betrachtungszeitraums noch technisch verbessert worden waren, kann davon ausgegangen werden, dass zukünftig eher noch höhere Produktivitätswerte realistisch sind.

Tabelle 17: Vergleich der Technischen Gesamtarbeitsproduktivität aller untersuchten Teilverfahren; Die Werte in Raummeter und Schüttraummeter errechnen sich aus den Ergebnissen für Festmeter unter Verwendung der Umrechnungsfaktoren in Kapitel 5.6.1, MDM: Mittendurchmesser

Teilverfahren	Mittlerer MDM[a] (cm)	TAP Buche (Fm/AKh)	TAP Fichte (Fm/AKh)	TAP Buche (Rm/AKh)	TAP Fichte (Rm/AKh)	TAP Buche (SRm/AKh)	TAP Fichte (SRm/AKh)
Spalthammer (SP, 33 cm)	17,9 (21,6/14,3)	0,12	0,43	0,19	0,67	0,29	1,08
Kleiner Senkrechtspalter (KS, 33 cm)	12,3 (12,4/12,2)	0,49	0,38	0,79	0,59	1,17	0,96
Großer Senkrechtspalter (GS, 1 m)	20,1 (19,6/20,4)	1,36	1,62	2,69	2,92	–	–
Großer Waagerechtspalter (WS, 1 m)	20,4 (-/20,4)	-	1,48	–	2,66	–	–
Kl. komb. Säge-Spaltmasch. (KK, 33 cm)	15,2 (14,6/16,0)	1,36	3,90	2,18	6,04	3,24	9,83
Gr. komb. Säge-Spaltmaschine (GK, 33 cm)	25,9 (25,9/-)	6,03	–	9,71	-	14,35	-
Brennholzkreissäge (KR, 33 cm)[b]	11,6 (11,5/11,7)	1,39	1,67	2,23	2,59	3,31	4,21
Aufschichten (SC, 33 cm)	–	1,88	1,88	2,98	2,98	4,63	4,63

[a] Werte in Klammern: Buche/Fichte
[b] Werte nur aus ungespaltenem Ausgangsmaterial

5.3 Ergebnisse der Arbeitsschwereuntersuchung

Die Arbeitsschwere bei der Scheitholzaufbereitung wurde sowohl empirisch mittels Befragung als auch über das sogenannten Multimomentverfahren mit Auswertung von Bilderfolgen (OWAS-Methode untersucht. Nachfolgend werden die Ergebnisse zu den beiden unterschiedlichen methodischen Ansätzen, die in Kapitel 4.2 erläutert werden, vorgestellt.

5.3.1 Befragung zur Arbeitsschwere

Auf einer Skala von 0 für „sehr leicht“ bis 5 für „sehr schwer“ wurden in der Befragung für die Einschätzung der Arbeitsschwere Mittelwerte zwischen 2,0 für Arbeiten am großen Spaltautomat und 4,4 für das Durchforsten erzielt (Abbildung 79). Zwischen den Befragten, die eigene Erfahrung mit diesen Arbeiten aufwiesen, und solchen, die die Arbeiten aus eigener Erfahrung nicht kannten, traten keine wesentlichen Unterschiede in der Bewertung auf. Kleinere Abweichungen kamen aber vor, so bewerteten die erfahrenen Befragten tendenziell die schweren Arbeiten noch ein wenig schwerer (Durchforsten 4,4 verglichen mit 4,1) und leichte noch ein wenig leichter (Arbeiten am großen Spaltautomat 2,0 verglichen mit 2,3). Auffallend ist die einheitliche Bewertung der leichtesten Arbeit, das Bedienen des großen Spaltautomaten (Bewertung 2,0). Auf dem Bild, welches dem Befragten hierzu als Orientierungshilfe dienen sollte, war ein Mann abgebildet, der stehend die Schalter des Bedienpults betätigte. Mit 2,0 ist diese Tätigkeit aber noch als "normal schwer" beschrieben, obgleich vom Arbeiter keine körperliche Arbeit wie Heben oder Senken etc. zu bewerkstelligen ist.

Dieses Beispiel verdeutlicht die Schwierigkeiten bei der Bewertung der Arbeitsschwere. Für die Befragten war offensichtlich die Tatsache, dass die Arbeiten im Außenbereich und in einem lauten Umfeld mit großen Holzmassen stattfinden, Grund genug, die relativ leichte Arbeit schon mit "normal schwer" zu beurteilen. Offenbar war hier nicht allein die Belastung durch die Beanspruchung des Stützapparates des Menschen ausschlaggebend.

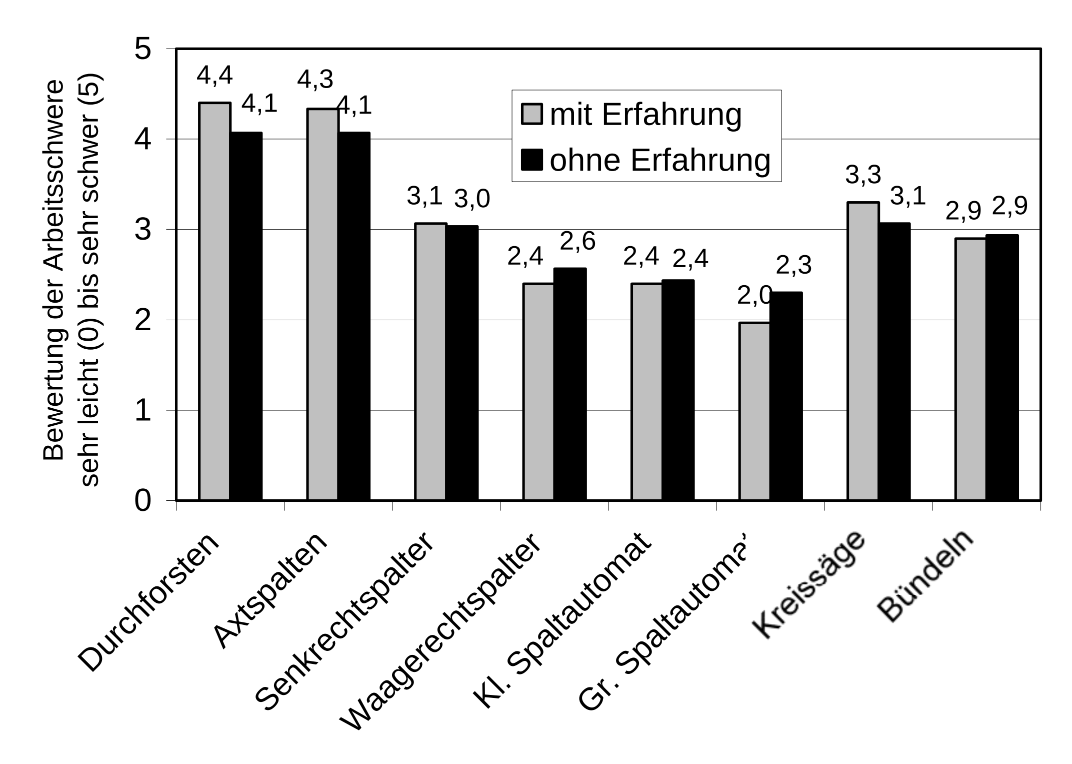


Abbildung 79: Ergebnisse der Befragung zur Einschätzung der Arbeitsschwere; Einteilung von sehr leicht (0) bis sehr schwer (5). Beim Senkrechtspaltern erfolgte keine Differenzierung in große oder kleine Geräte

5.3.2 Arbeitsschwereindex nach der OWAS-Methode

Auf Basis der in Kapitel 4.2.2 vorgestellten Methode der Arbeitsschwereuntersuchung nach OWAS wurde der aus den bildanalytischen Auswertungen abgeleitete Belastungsindex L nach Lundquist für jedes Arbeitsverfahren ermittelt. Dabei werden die Belastungsindizes auch differenziert für die Ablaufabschnitte innerhalb der Arbeitsverfahren berechnet. Über die darin gleichzeitig dargestellten Zeitanteile der Ablaufabschnitte, die aus den OWAS-Bilderfolgen parallel ausgewertet wurden, lässt sich dann für jedes Arbeitsverfahren ein gewichteter Gesamtindex berechnen. Diese Vorgehensweise war erforderlich, damit auch solche Arbeitsverfahren bewertet und verglichen werden können, bei denen mehr als nur eine einzige Arbeitskraft eingesetzt worden war, zumal dann die zweite Person nicht zeitgleich mit einer Videokamera beobachtet worden war, sondern rechnerisch über die Zeitanteile und den separat gemessenen Teil-Belastungsindex hinzugefügt wurde. Die Berechnung der ablaufabschnittbezogenen Teilindizes erlaubt außerdem eine differenziertere Bewertung der Verfahren, weil auf diese Weise auch Belastungsspitzen innerhalb des Arbeitsablaufes sichtbar werden. Die ebenfalls dargestellten Zeitanteile der Ablaufabschnitte sollten allerdings nicht für eine Charakterisierung des Gesamtverfahrens herangezogen werden, da es sich hierbei im Vergleich zu den umfangreichen Zeitstudien in Kapitel 4.1 um vergleichsweise kurzzeitige Messungen mit geringerer Repräsentativität handelt.

Die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt. Eine vergleichende Gegenüberstellung erfolgt in den Kapiteln 5.3.4 und 5.3.5. Alle angegebenen Werte beziehen sich auf die reine Arbeitszeit (RAZ). Weitere Einzelheiten zu den Messungen sind in einer Diplomarbeit, die im Rahmen des vorliegenden Projekts durchgeführt wurde, dokumentiert (vgl. DECKER [13]).

5.3.2.1 Holzernte

Für die Untersuchung der Arbeitsbelastung bei der Holzernte (Durchforstung) eines jungen Bestandes (JD) wurden 282 Momentaufnahmen aus zwei Holzerntemaßnahmen ausgewertet. Die erste Untersuchung ergab für die Arbeitskraft einen Belastungsindex von L=176, in der zweiten Untersuchung lag sie bei L=197. Das ergibt einen Mittelwert für die Gesamtuntersuchung von L=186. Im Vergleich zu den übrigen Messwerten der Brennholzbereitstellung kann dieser Wert als relativ schwer eingestuft werden (vgl. hierzu auch Kapitel 5.3.5). Der höchste Teilwert wird beim Entasten ermittelt (L=220). Dieser Ablaufabschnitt hat mit 36 % auch den größten zeitlichen Anteil bei der Holzernte. Die geringste Belastung ergibt sich mit L=118 beim "Gehen" zum nächsten Baum, der gefällt werden soll (Abbildung 80).

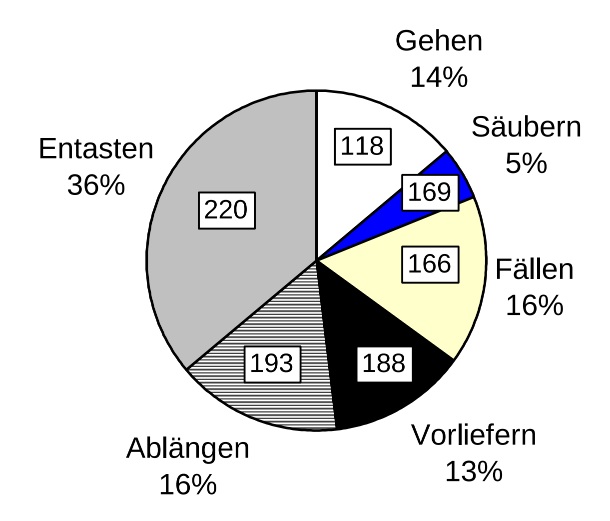


Abbildung 80: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte bei der Holzernte (Durchforsten)

Der in Abbildung 80 dargestellte Teilwert für den Abschnitt Entasten erscheint zunächst relativ hoch, auch im Vergleich zu Messungen, die aus der Literatur für ähnliche Teilarbeiten bekannt sind. Hierbei sei auf eine österreichische Untersuchung von FREI [19] verwiesen, der für das Entasten einen OWAS-Wert von L=165 angibt. Dieser Unterschied lässt sich jedoch durch die Tatsache erklären, dass die österreichischen Messungen in einem Hochwald (Altdurchforstung AD) durchgeführt wurden, bei dem im Gegensatz zur Holzernte im Jungbestand (Jungdurchforstung, JD) das zu entastende Material wegen des größeren Baumdurchmessers höher aufliegt, wodurch die Arbeiten in einer weniger gebeugten Körperhaltung erfolgen können. Zusätzlich können die Unterschiede durch eine möglicherweise unterschiedliche Körpergröße der Probanden und ihre unterschiedliche Professionalität (ggf. rückenschonendere Arbeitsweise) zustande gekommen sein. Bei der Jungdurchforstung ist deshalb anzuraten, nicht, wie in der vorliegenden Untersuchung, das am Boden liegende Holz zu entasten, sondern es erhöht zu lagern, um so ein ergonomisches Arbeiten zu ermöglichen. Generell ist festzuhalten, dass die genannte Arbeit von FREI [19] wegen des andersartigen Untersuchungsobjektes (Hochwald statt junger Bestand) und zum Teil auch wegen der geringeren methodischen Zuverlässigkeit (es wurden keine Videobildsequenzen ausgewertet) nur begrenzt mit den vorliegenden Messungen vergleichbar ist und hier nur we-

gen der ansonsten generell fehlenden Vergleichsuntersuchungen für die Brennholzgewinnungsverfahren zur allgemeinen Orientierung genannt sein soll. Als weiteres Teilergebnis gibt FREI [19] für das Fällen einen Belastungsindex von L=171 an, hierbei besteht eine gute Übereinstimmung mit der vorliegenden Untersuchung, in der die Fällarbeit mit L=166 wegen der kleineren Baumdurchmesser geringfügig günstiger bewertet wird. Derartige Unterschiede liegen jedoch im Rahmen der üblichen Messwertschwankungen (vgl. hierzu Kapitel 5.3.3). Alle weiteren Ablaufabschnitte der österreichischen Untersuchung (L=133 für das Keilen und L=125 für Sonstige Verteilzeiten, SVZ) lassen sich nicht unmittelbar mit den hier gemessenen Werten vergleichen.

5.3.2.2 Spalten mit der Axt

Beim Axtspalten wurde die Arbeit zweier Probanden über jeweils zwei Stunden untersucht, so dass je Versuchsperson 248 Videobilder ausgewertet wurden. Der daraus berechnete Belastungsindex liegt bei L=179, wobei die Bandbreite der Ergebnisse der zwei Untersuchungen von L=167 bis L=190 reichte. Der Arbeitsablaufabschnitt "Holz ablegen" erwies sich hierbei als am stärksten belastend. Hierunter ist in diesem Fall das Auflesen vom Boden und das Werfen in eine nebenstehende Box oder auf einen daneben liegenden Haufen zu verstehen. Das ständige Bücken führt hierbei zu einer hohen Belastung. Insgesamt sind aber auch die anderen Ablaufabschnitte als eher belastend einzustufen (Abbildung 81).

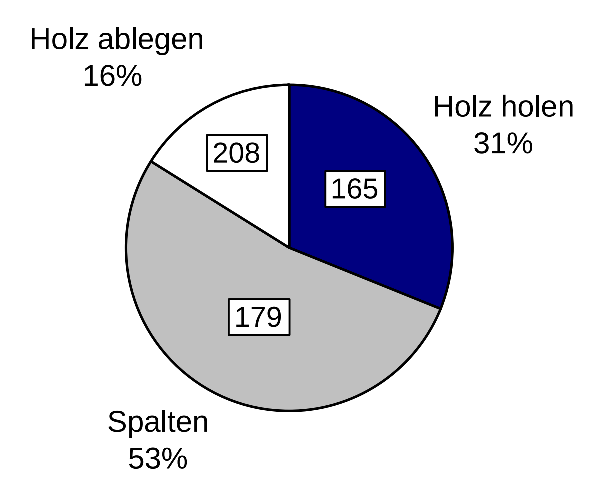


Abbildung 81: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte beim Spalten mit der Axt

5.3.2.3 Senkrechtspalter

Insgesamt wurde beim Spalten mit Senkrechtspaltern eine Zeitspanne von 6,6 Stunden als Videofilm an drei verschiedenen Spaltern aufgezeichnet. Daraus wurden 823 gespeicherte Einzelbilder (Momentaufnahmen) herausgefiltert. Als Gesamtbelastungsindex für die Arbeiten am Senkrechtspalter errechnet sich ein Wert von L=142. Die Bandbreite liegt zwischen L=121 und L=154 (Abbildung 82). Drei Probanden wurden eingesetzt. Bei zweien waren die Belastungsindizes mit L=149 bzw. L=154 eher wenig belastend, während der dritte sich mit nur L=122 hiervon etwas abhob. Zwei Gründe sind hierfür anzuführen: Zum einen war das dritte Spalterfabrikat mit einer

besseren, weil beweglicheren Halterung des zu spaltenden Rundholzes ausgestattet, die eine optimale Positionierung der Hand erlaubt und zum anderen war der Proband mit 165 cm kleiner als die anderen beiden Probanden (180 cm bzw. 178 cm), wodurch er besser an die gegebene Gerätehöhe angepasst war und in einer aufrechteren Haltung während des Spaltvorgangs arbeiten konnte, zumal das Spalten hier mit 57 % Arbeitszeitanteil dominierte.

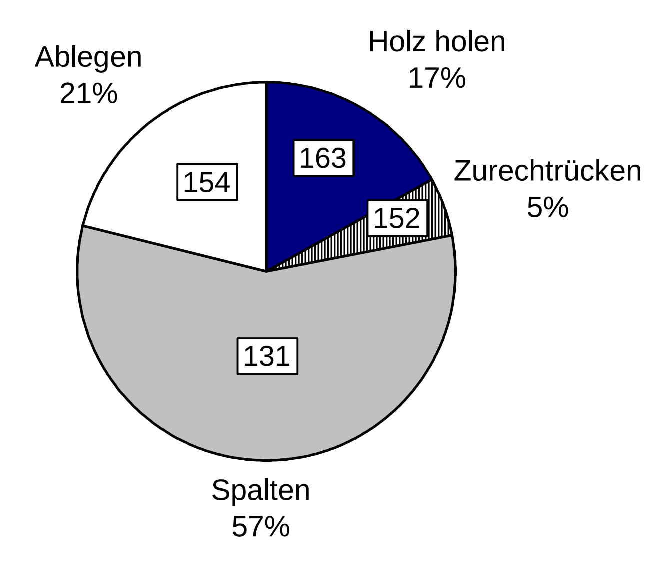


Abbildung 82: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte im Verfahren "Senkrechtspalter"

5.3.2.4 Waagerechtspalter

In der vorliegenden Untersuchung wurden zwei Modelle von Waagerechtspaltern untersucht. Der Durchschnitt der verschiedenen Belastungsindizes wurde aus 541 Momentaufnahmen (entspricht 4,5 Stunden Beobachtungsdauer) berechnet, er liegt bei L=117. Die Extremswerte liegen bei L=109 bzw. L=129.

In dieser Studie war die Einteilung in einzelne Arbeitsablaufabschnitte schwierig, da sich die ausgewerteten Halbminutenbilder oftmals nicht zweifelsfrei einem bestimmten Abschnitt zuordnen ließen. Zur Arbeitsschwere in den einzelnen Arbeitsablaufabschnitten kann daher hier keine Aussage gemacht werden.

5.3.2.5 Kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine

Die kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine ("Kleiner Spaltautomat") wurde in fünf Untersuchungen an zwei verschiedenen Fabrikaten bewertet. Der Durchschnitt der verschiedenen Belastungsindizes wurde aus 577 Momentaufnahmen (entspricht 4,6 Stunden Beobachtungsdauer) berechnet, er liegt im Mittel bei L=109 (Abbildung 83), wobei die einzelnen betrachteten Ablaufabschnitte des Verfahrens in einer Bandbreite von L=100 (z. B. Sägen) bis L=113 (Fördern) schwanken. Diese Werte können durchgehend als wenig belastend eingeordnet werden, wobei das

Sägen und das Zurechtrücken sogar den niedrigstmöglichen OWAS-Wert annehmen können (L=100).

Ein scheinbarer Widerspruch ergibt sich aus der Tatsache, dass der Belastungsindex für den kleinen Spaltautomat, bei dem das Holz von Hand zugeführt werden muss, einen niedrigeren Wert einnimmt, als der Wert für den großen Spaltautomat (vgl. Kapitel 5.3.2.2), bei dem hauptsächlich nur die Maschine überwacht werden muss. Dies lässt sich aber dadurch erklären, dass die Bedienperson beim großen Spaltautomat neben den Steuerungsaufgaben auch noch Ablaufstörungen beheben muss, beispielsweise sind eingeklemmte Holzstücke zu lösen, was kurzzeitig zu sehr hohen Belastungen führt.

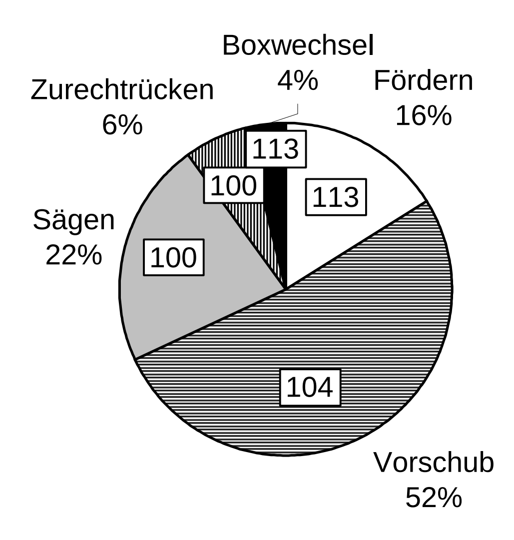


Abbildung 83: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte beim kleinen Spaltautomaten

5.3.2.6 Große kombinierte Säge-Spaltmaschine

Bei der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine ("Großer Spaltautomat") wurden zwei verschiedene Geräte untersucht, wobei insgesamt 350 Momentaufnahmen (entspricht 2,8 Stunden Beobachtungsdauer) ausgewertet wurden. Die beiden untersuchten Maschinen zeigten unterschiedliche Ergebnisse. Während die Arbeit am Fabrikat 1 (Herkules II; Kretzer) zu einer Belastung von L=111 führte, liegt der Wert beim Fabrikat 2 (SSA D650; S&Ü) um 19 Punkte höher (L=130). Als Mittelwert für beide Verfahren ergibt sich ein OWAS-Wert von L=118, hierbei sind allerdings die Messungen an Fabrikat 1 stärker berücksichtigt, da diese Maschine zweimal untersucht und somit ein längerer Messzeitraum ausgewertet wurde. Eine Unterscheidung der einzelnen Arbeitsablaufabschnitte war bei den Messungen an den großen kombinierten Säge-Spaltmaschinen nicht möglich.

5.3.2.7 Brennholzkreissäge

Mit der Brennholzkreissäge wurde insgesamt ein 2-stündiger Arbeitsablauf als Videofilm aufgezeichnet, woraus 241 gespeicherte Einzelbilder ausgewertet wurden. Es kamen zwei Probanden an zwei verschiedenen Wippkreissägen zum Einsatz. Der berechnete mittlere Belastungsindex beträgt für das Arbeiten mit der Brennholzkreissäge L=145. Die Werte der beiden Probanden unterscheiden sich um 18 Punkte (L=136 und L=154). Wie in Abbildung 84 zu sehen ist, teilt sich der Arbeitsablauf zu 29 % in "Scheit holen"(L=138), zu 27 % in "Sägen" (L=147) und zu 44 % in "Scheit ablegen" (L=149) auf.

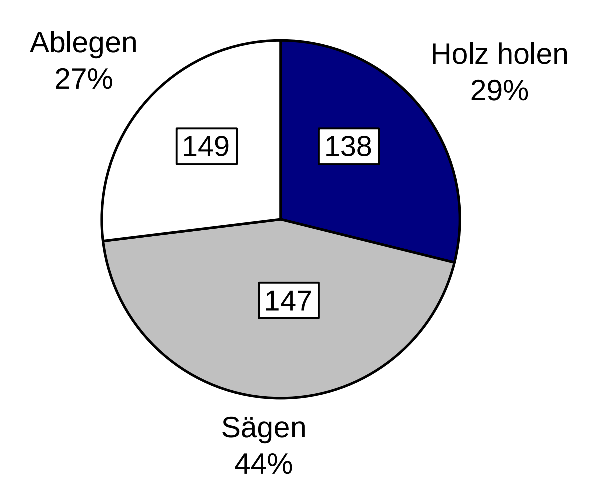


Abbildung 84: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte beim Arbeiten mit der Brennholzkreissäge

5.3.2.8 Zubringen von Holz

Für das Zubringen von Holz zur weiteren Aufbereitung wurden insgesamt 364 Momentaufnahmen bewertet. Die Aufnahmen kamen vollständig bei den Arbeiten am Waagerechtspalter mit Rundholz zustande, sie sind aber prinzipiell auch relevant für andere Aufbereitungsverfahren. Der berechnete Belastungsindex für dieses Zubringen liegt bei L=159 und weist eine Bandbreite von L=146 bis L=166 auf, je nachdem, um welchen der zwei Probanden es sich handelte. Dabei sind die einzelnen Arbeitsablaufabschnitte sehr unterschiedlich in einer Bandbreite von L=113 für Warten bis L=201 für das händische Beladen des Gerätes mit Rundholz zu bewerten (Abbildung 85). Ohne den Ablaufabschnitt "Warten" würde der Gesamtwert bei L=176 liegen. Das Ergebnis des Arbeitsablaufabschnittes "Beladen" unterscheidet sich je nach Art der Durchführung, d. h. der Belastungsindex liegt bei Verwendung eines Sappi bei L=151 und steigt bei händischem Beladen auf L=201. Dies zeigt deutlich, dass es sinnvoll ist, derartige Hilfsgeräte einzusetzen, um die Arbeitsbelastung zu mindern, auch wenn ein solcher Ablauf zunächst für den Arbeiter umständlich erscheinen mag.

Im beobachteten Verfahrensbeispiel wurde neben dem Holzzuführen auch das gespaltene Holz von der Ablage entfernt und auf einen Stapel geschichtet. Hierbei wäre die Arbeit nicht so belastend, wenn das Holz auf einer Höhe von Oberschenkel bis maximal Schulterhöhe aufgeschichtet

würde. Im Normalfall, so auch bei dieser Untersuchung, wird es aber vom Boden bis auf Kopfhöhe gestapelt und erhält daher mit L=171 einen vergleichsweise hohen Belastungswert.

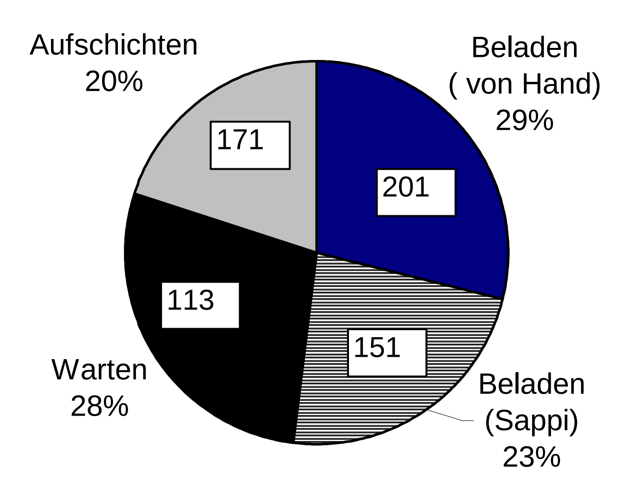


Abbildung 85: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte beim Zubringen des Holzes

5.3.2.9 Schichten in Stapeln und Bündelhilfen

Insgesamt wurden 465 Momentaufnahmen (aus 4,2 Stunden Arbeitszeit) zum Stapeln und Binden des Scheitholzes zu Rundbündeln bewertet, wobei drei Probanden zum Einsatz kamen. Die berechnete Bandbreite des Belastungsindexes für diese drei bewerteten Abläufe liegt zwischen L=130 und L=148 wobei ein Durchschnittswert von L=140 erzielt wurde. Die Arbeitsschwerebewertung und zeitliche Aufteilung der hierbei jeweils unterschiedenen vier Ablaufabschnitte ist in Abbildung 86 dargestellt. Dabei hat das eigentliche Stapeln, also das Einschichten der Scheite in die Bündelhilfe, mit 52 % den höchsten Anteil dieser Arbeit. Den zweithöchsten Anteil nimmt das Binden der Rundbündel ein. Das Zusammenzurren der Scheite mit einer Rätsche vor dem Binden und das Kippen des fertigen Bündels aus der Bündelhilfe haben mit 7 % bzw. 9 % eine kleinen aber nicht zu vernachlässigenden Anteil am Gesamtverfahren. Der Anteil des Arbeitsablaufabschnittes "Stapeln" variiert mit dem Weg, über den die Scheite zur Bündelhilfe angeliefert werden müssen, und mit der Größe der zu erstellenden Bündel (0,5 Rm oder 1 Rm, vgl. hierzu Zeitstudien in Kapitel 5.2.8).

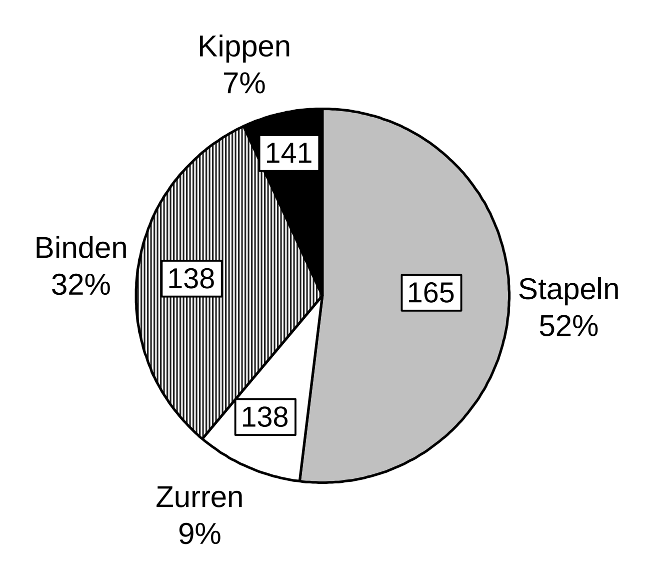


Abbildung 86: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte beim Bündeln mit einer Bündelhilfe

In der Praxis kann der Belastungsindex für diese Arbeiten kaum durch eine bessere Arbeitsorganisation verbessert werden. Hierzu müssten die zu bündelnden Scheite an einer Stufe oder auf einer angehobenen Plattform abgelegt worden sein, damit die Arbeit bei der Aufnahme der Scheite weniger gebückt erledigt werden kann. Eine solche Verbesserung der ergonomischen Verhältnisse liegt jedoch selten vor, so dass der hier gemessene Wert von L=165 für das Stapeln alleine als typisch gelten kann. Dies bestätigt auch der im vorherigen Kapitel 5.3.2.8 gemessene Wert für das Stapeln alleine L=171. Somit ergibt sich für das Schichten ohne Bündelhilfe ein Mittelwert aus beiden Angaben von L=168.

Bei 33 cm-Scheiten, die vom Boden bis auf eine Höhe von einem Meter geschichtet werden, liegt der Belastungsindex aufgrund der gebeugten Haltung dagegen bei L=250. Dieser Wert ist extrem hoch. Er wurde anhand der Aufnahmen zur Bestimmung der Umrechnungsfaktoren bestimmt, bei denen das Holz in drei Reihen hintereinander in einen Stapelrahmen geschichtet wurde (vgl. Kapitel 4.4.2). Er dürfte in der Praxis, bei der das Holz höher und in einer Reihe an die Hauswand geschichtet wird nicht so hoch ausfallen.

5.3.3 Reproduzierbarkeit und Repräsentativität der Bestimmungsmethode nach OWAS

Zeitversetzte Bilderauswahl. Zur Feststellung der Reproduzierbarkeit wurde das Momentaufnahmeintervall in ausgewählten Teilstudien variiert (vgl. Kapitel 5.3.2.2, 5.3.2.3, 5.3.2.5). Die um 15 Sekunden zeitversetzte Bilderfolge führte zu gut reproduzierbaren Ergebnissen, mit L=164 zu L=167 beim "Spalten mit der Axt", L=154 zu L=157 beim "Spalten mit dem Senkrechtspalter" und L=101 zu L=102 beim "Spalten mit dem kleinen Spaltautomat" sind die Unterschiede marginal (Tabelle 18). Der Variationskoeffizient liegt damit im Bereich von maximal 1 %.

Tabelle 18: Vergleich der beiden Belastungsindizes (L) für dasselbe Verfahrensbeispiel, jedoch einmal mit und einmal ohne Zeitversatz der ausgewerteten Bilderfolgen

Auswertebeispiel	Proband	Startzeit der Momentaufnahmen	L
Spalten mit der Axt	N	t = 0 s	167
	N	t = +15 s	164
Senkrechtspalter	K	t = 0 s	157
	K	t = +15 s	154
Kleiner Spaltautomat	D	t = 0 s	102
	D	t = +15 s	101

Verdopplung der Bilderfrequenz. Zur Verifizierung der Methode wurde die Anzahl der Momentaufnahmen je Zeitfolge in ausgewählten Teilstudien verdoppelt, indem die Intervallabstände halbiert wurden (vgl. Kapitel 5.3.2.2, 5.3.2.3, 5.3.2.5). Auch ein solchermaßen erhöhter Datenumfang für dieselbe Untersuchung zeigt nur eine geringe Wirkung auf das Ergebnis. Die Unterschiede liegen bei vier bis maximal sieben Indexpunkten (Tabelle 19).

Tabelle 19: Vergleich der beiden Belastungsindizes (L) für dasselbe Verfahrensbeispiel, jedoch einmal mit 15- und einmal mit 30-Sekundenintervallen für die ausgewerteten Bilderfolgen (d.h. doppelte bzw. halbe Bilderanzahl)

Auswertebeispiel	Proband	Momentaufnahmeintervalle	L
Spalten mit der Axt	N	30 s	167
	N	15 s	163
Senkrechtspalter	K	30 s	157
	K	15 s	153
Kleiner Spaltautomat	D	30 s	102
	D	15 s	109

Für diese Unschärfen lassen sich verschiedene Gründe anführen. Zum einen rechnet das Programm WinOWAS ausschließlich mit ganzen Zahlen für die prozentuale Verteilung der verschiedenen Maßnahmeklassen, dabei wird ab 0,5 Prozentpunkten aufgerundet. Für das Ergebnis des Belastungsindexes L kann sich hierdurch eine Abweichung von bis zu fünf Punkten Unterschied ergeben, so dass durch Rundungsfehler mit einem entsprechenden "Rauschen" zu rechnen ist. Es verdeutlicht, dass einer Abweichung für den Belastungsindex von sieben Punkten keine besondere Bedeutung beigemessen werden kann und die in diesem Intervall ermittelten Ergebnisse als gleich angesehen werden können. Mit 30 Sekunden lag das Aufnahmeintervall weit unter der Dauer des jeweils kürzesten Arbeitsablaufabschnitts der verschiedenen Verfahren, so dass die Verkürzung des Aufnahmeintervalls auf 15 Sekunden erwartungsgemäß keine Veränderung des Belastungsindexes ergab.

5.3.4 Zusammenstellung und Vergleich

Vergleich einzelner Teilverfahren. Die Indizes der Arbeitsbelastung für "Durchforsten", "Spalten mit der Axt", und "Zubringen" sind mit L=186, L=179 und L=176 relativ hoch. Bei den Verfahren "Brennholzkreissäge", "Senkrechtspalter" und "Bündelhilfe" liegen sie mit ca. L=140 im mittleren Bereich, während die Werte der Verfahren "Waagerechtspalter" und "Spaltautomat" mit Werten von L=109 bis 118 erwartungsgemäß am niedrigsten sind (Abbildung 87). Eine Bewertung und Zuordnung dieser Messwertebandbreite erfolgt in Kapitel 5.3.5.

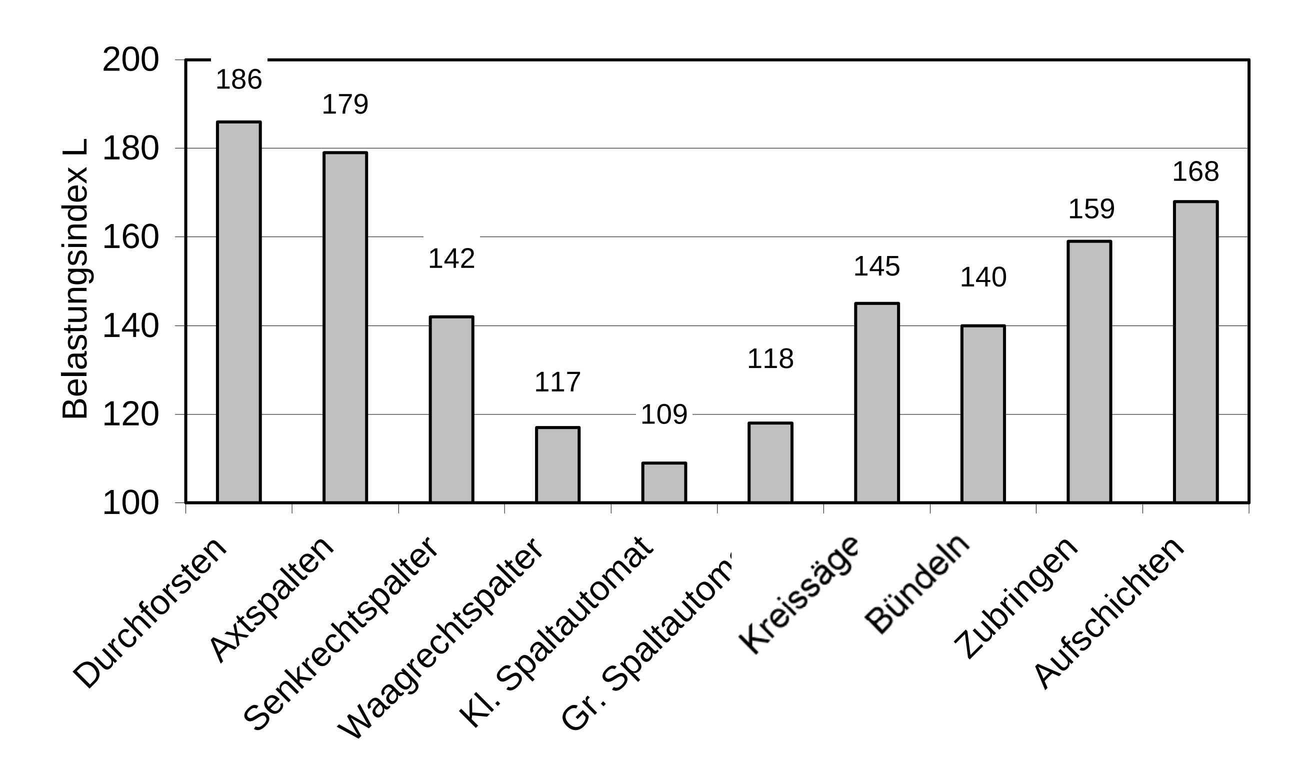


Abbildung 87: Belastungsindex L für die verschiedenen möglichen Arbeiten (Teilverfahren) einer Scheitholzbereitstellungskette (Ursprung der Y-Achse bei 100, da hier der niedrigste OWAS-Wert liegt).

Vergleich zwischen OWAS- und Umfrageergebnissen. Die in der Umfrage (Kapitel 5.3.1) festgestellte subjektive Einschätzung der Befragten hinsichtlich der Belastungen bei der Scheitholzbereitstellung stimmt gut überein mit der Bewertung der Belastung mit Hilfe der OWAS-Methode, das zeigt Abbildung 88. In der Darstellung wurde dabei der Belastungsindex beim Verfahren "Kleiner Spaltautomat" als Referenzwert 100 % festgelegt. Um einen Vergleich der beiden Untersuchungen zu ermöglichen, wurde der relative Unterschied zum diesem Referenzverfahren für die übrigen Verfahren errechnet.

Die hierbei festzustellende weitgehende Übereinstimmung der Tendenzen wird nur beim Verfahren "Spalten mit dem großen Spaltautomat" durchbrochen (Abbildung 88). Diese auftretende Abweichung ist dadurch erklärbar, dass das Erläuterungsbild, das dem Umfragebogen beigefügt war, für dieses Verfahren nur eine an der Steuerungseinheit der Maschine stehende Bedienperson zeigte, so dass die zusätzlichen Aufgaben, die diese Person noch erfüllen musste (z. B. das Lösen von

verklemmten Holzstücken) nicht erkennbar und damit auch nicht bewertbar waren. Hierin besteht ein wesentlicher Unterschied zur OWAS-Methode, bei der sämtliche Arbeitsabläufe des Bedieners anteilig beurteilt werden.

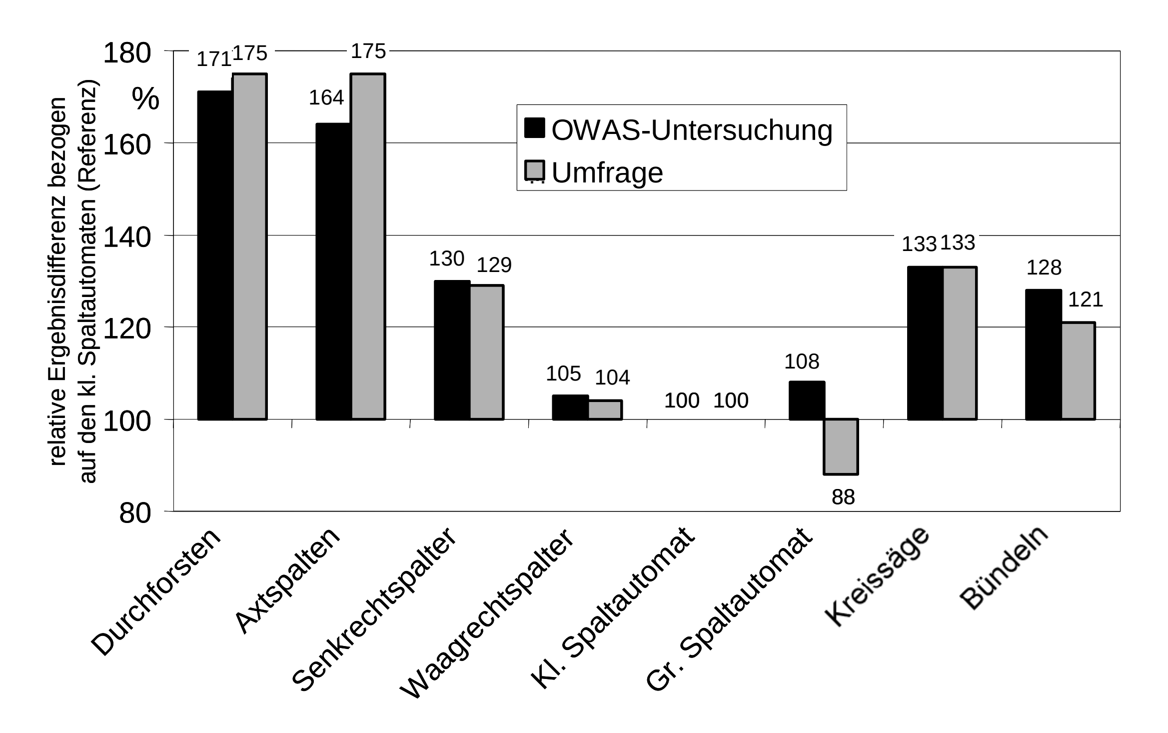


Abbildung 88: Vergleich der Belastungsindizes nach OWAS mit den Ergebnissen der Befragung, bezogen auf eine einheitliche Bezugsbasis (hier: kleiner Spaltautomat = 100 %)

5.3.5 Klassifizierung der Belastungsindizes

Die in Kapitel 5.3.4 dargestellte Messwerte-Bandbreite reicht von L=109 bis L=189 (vgl. Abbildung 87), wobei in einzelnen Verfahrensabschnitten, wie dem Beladen einzelner Maschinen von Hand, auch Durchschnittswerte von mehr als L=200 vorkommen können. Es kann angenommen werden, dass OWAS-Mittelwerte über L=200 wegen der notwendigen Ruhe- und Erholungspausen zwischen den besonders stark belastenden Bewegungsabläufen generell nur relativ selten dauerhaft vorkommen, zumal selbst bei der gemeinhin als besonders anstrengend geltenden Durchforstungsarbeit Maximalwerte bis L=200 erzielt werden. Das gilt umso mehr, als mit der OWAS-Methode eine eventuelle sitzende Tätigkeit nicht günstiger bewertet würde als eine stehende, obgleich in der Realität hier zweifellos größere Belastungsunterschiede bestehen. Die optimale Haltung eines Arbeitsplatzes ist nach OWAS lediglich als eine aufrechte Arbeitsposition festgelegt (keine gebeugte Haltung), bei der beide Arme unterhalb der Schulterhöhe tätig sind. Sie ergibt den niedrigsten Belastungsindex von L=100.

Angesichts dieses Startwertes und der durch die Mittelwertbildung praktisch zwangsläufig nach oben hin begrenzten Bandbreite des Indexes wird in Tabelle 20 ein Vorschlag für eine Interpretation und Klassifizierung der gemessenen OWAS-Mittelwerte gemacht. Die Tabelle charakterisiert den Bereich von L=100 bis L>200 mit einer Bandbreite von "kaum belastend" bis "sehr belastend". Diese Einschätzung entspricht auch der subjektiven Erfahrung der Versuchsansteller. Sie

wird aber vor allem durch die hierzu durchgeführte Befragung (vgl. Kapitel 5.3.1) gestützt. Darin hatte sich gezeigt, dass beispielsweise die besonders belastungsintensive Durchforstung von den Befragten überwiegend mit nahezu dem Maximalwert ("sehr schwer") eingestuft wurde (4,4 von maximal 5 Bewertungspunkten, vgl. Abbildung 79).

Tabelle 20: Klassifizierungsvorschlag für eine Beurteilung und Interpretation der gemessenen Belastungsindizes bei der Brennholzbereitstellung

Bereiche des Belastungsindexes L	Allgemeine Klassifizierung (Interpretation)
100 – 120	kaum belastend
121 – 140	wenig belastend
141 – 160	eher wenig belastend
161 – 180	eher belastend
180 – 200	belastend
> 200	sehr belastend

5.4 Ergebnisse zu den Energieverbrauchsmessungen

Die durchgeführten Energieverbrauchsmessungen wurden parallel zu den ebenfalls durchgeführten Arbeitszeitmessungen durchgeführt, daher sind die nachfolgend vorgestellten Versuche in der gleichen Weise bezeichnet, wie die Zeitstudien in Kapitel 5.2. Allerdings war nicht in allen Fällen eine Energieverbrauchsmessung möglich, so dass auch nicht zu jeder Zeitstudie Daten vorliegen. Sämtliche Erläuterungen zu den gegebenen Rahmenbedingungen der Messungen (Verfahren, Maschinenkenndaten, Einsatzort etc.) sind in Steckbriefform im Anhang 11.1 zusammengestellt. Das methodische Vorgehen wird im Kapitel 4.3 vorgestellt.

Bei den Ergebnissen handelt es sich entweder um Kraftstoff- oder um Stromverbrauchsmessungen, je nach Antriebsart für das jeweilige Gerät. Da die Aufbereitungsform bei den einzelnen Studien unterschiedlich war (verschiedene Längen, Lagerarten etc., vgl. Kapitel 4.1), sind sämtliche Messwerte einheitlich auf einen Festmeter bezogen, um einen Vergleich des spezifischen Energieverbrauchs zwischen den einzelnen Studien zu ermöglichen. Für die dadurch gegebenenfalls notwenigen Umrechnungen wurde auf die eigenen Umrechnungsfaktoren zurückgegriffen, die in der vorliegenden Untersuchung ebenfalls bestimmt worden waren (vgl. Kapitel 5.6.1). Zur besseren Anwendbarkeit der Ergebnisse in der Praxis werden die Werte des Energieverbrauchs zusätzlich auch auf ein einheitliches Scheitholzvolumenmaß (Raummeter) umgerechnet, wobei hierfür einheitlich die Aufbereitungsform der gespaltenen geschichteten Meterholzscheite gewählt wurde. Um die verbrauchte Energiemenge von Verbrennungsmotoren mit denen der Elektromotoren zu vergleichen, wird der Verbrauch von Dieselkraftstoff zusätzlich in Kilowattstunden angegeben (1 Liter Diesel ≡ 10 kWh). Vereinfachend wird dabei auf eine Berücksichtigung der unterschiedlichen Primärenergieaufwendungen, die für die Bereitstellung dieser Endenergieträger zuvor erforderlich sind, verzichtet. Eine entsprechende Berücksichtigung erfolgt aber in der Prozesskettenanalyse in Kapitel 6.2.6.

5.4.1 Kraftstoffverbrauch der Motorsäge bei der Holzernte

Bei der Durchforstung wurde der Kraftstoffverbrauch in einem Fichten-Eschen Mischbestand (vgl. Teilarbeitstudie 1 im Anhang 11.1) gemessen. Die verwendete Motorsäge (Stihl 020 mit 1,6 kW Motorleistung) benötigt als Kraftstoff ein Zweitakt-Gemisch. Es ist mit einem Kraftstoffverbrauch von ca. 0,3 Litern Benzingemisch je Festmeter Holz zu rechnen (Tabelle 21). Bei einem Heizwert für Benzin von 8,77 Kilowattstunden je Liter entspricht dies einem Energieverbrauch von ca. 2,6 kWh/Festmeter. Daraus errechnet sich ein Verbrauch von 1,4 kWh pro Raummeter (Meterholz, gespalten geschichtet). Zusätzlich wurde der Verbrauch an Verlustschmieröl für die Sägekette erfasst. Er lag bei 0,05 l/Fm bzw. 0,03 l/Rm.

Tabelle 21: Ergebnisse der Kraftstoffverbrauchsmessung für die Motorsäge bei der Holzernte (Jungdurchforstung)

Teilstudie	Baumarten	spezifischer Kraftstoffverbrauch	
		in l/Fm	in l/Rm[a]
Holzernte Teilstudie 1	Fichte 75% Esche 25%	0,30	0,16

[a] Umrechnung der Raummaße nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.6.1); hier: Meterscheite, gespalten, gestapelt; Umrechnungsfaktor ist ein Mittelwert aus den Werten für Buche und Fichte (hier: 1,89)

5.4.2 Stromverbrauch beim kleinen Senkrechtspalter

Der spezifische Stromverbrauch des kleinen Senkrechtspalters ist bei Fichtenholz mit 1,8 kWh/Fm höher als bei Buchenholz mit 1,37 kWh/Fm (Tabelle 22). Dies ist im wesentlichen auf den höheren Wert der Teilstudie KS 1 zurückzuführen. Mit durchschnittlich 0,64 kW mittlerer Leistungsaufnahme werden nur ca. 21 % der vom Hersteller angegebenen maximalen Leistungsaufnahme von 3 kW genutzt. Bei den Messungen handelt es sich durchweg um denselben Spalter und um dieselbe Arbeitskraft. Die Bezeichnung der Studien ist analog zu den Zeitstudien (Kapitel 4.1), die Rahmenbedingungen sind in den Verfahrenssteckbriefen in Anhang 11.1 zusammengestellt.

Tabelle 22: Gemessener Stromverbrauch beim Spalten mit dem kleinen Senkrechtspalter

Teilstudie	Baumart	Mittlere Leistungsaufnahme (kW)	Spezifischer Stromverbrauch	
			in kWh/Fm	in kWh/Rm[a]
KS 2	Buche	0,53	1,12	0,57
KS 4	Buche	0,63	1,21	0,61
KS 6	Buche	0,72	1,79	0,90
Mittelwerte:	Buche	*0,63*	*1,37*	*0,69*
KS 1	Fichte	0,53	2,30	1,27
KS 3	Fichte	0,68	1,35	0,75
KS 5	Fichte	0,70	1,76	0,98
Mittelwerte:	Fichte	*0,64*	*1,80*	*1,00*

[a] Umrechnung der Raummaße nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.6.1); hier: Meterscheite, gespalten, gestapelt

5.4.3 Dieselverbrauch beim großen Senkrecht- und Waagerechtspalter

In Tabelle 23 sind die Ergebnisse der Dieselkraftstoff-Verbrauchsmessungen zusammengestellt, die beim Spalten mit den großen Senkrecht- und Waagerechtspaltern (GS- und WS-Studien) durchgeführt wurden. Die Leistungen der Schlepper waren im einzelnen wie folgt (vgl. Einsatzsteckbriefe in Anhang 11.1):

- GS 1 und 2: 57 kW (78 PS)
- GS 3: 55 kW (75 PS)
- WS 1: 50 kW (68 PS)

Beim Waagerechtspalter ist der spezifische Energieverbrauch am geringsten. Dies ist zum einen auf den geringeren Verbrauch des Schleppers zurückzuführen, zum anderen lag hier aber auch eine deutlich effizientere Arbeitsgestaltung vor, so dass insbesondere durch die höhere Produktivität (vgl. Kapitel 5.3.2.4) ein günstigerer spezifischer Verbrauchswert zustande kam. Die Rahmenbedingungen der Messungen sind in den Verfahrenssteckbriefen in Anhang 11.1 zusammengestellt.

Tabelle 23: Ergebnisse der Dieselkraftstoff(DK)-Verbrauchsmessung mit den großen Spaltern. GS großer Senkrechtspalter, WS Waagerechtspalter

Teilstudie	Baumart	DK-Verbrauch (l/h)	Spezifischer DK-Verbrauch	
			in l/Fm	l/Rm[a]
GS 2	Buche	2,30	1,54	0,78
GS 1	Fichte	2,37	1,38	0,77
GS 3	Fichte	1,72	0,98	0,54
WS 1	Fichte	1,21	0,51	0,28

[a] Umrechnung der Raummaße nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.6.1); hier: Meterscheite, gespalten, gestapelt

In Tabelle 24 wird der Dieselkraftstoffverbrauch aus Tabelle 23 in kWh umgerechnet dargestellt, um ein Vergleichbarkeit des Endenergieverbrauch von Kraftstoffen und elektrischem Strom zu ermöglichen. Zur Umrechnung wurde der Faktor 10 verwendet (1 l Dieselkraftstoff ≡ 10 kWh). Zusätzlich sind in Tabelle 24 nur die Werte der Stromverbrauchsmessung aus der Studie GS 6 genannt.

Für den Anwender eines Holzspalters ergibt sich aus den Ergebnissen in Tabelle 24, dass ein elektrischer Antrieb, sofern dieser aufgrund eines vorhandenen Stromanschlusses möglich ist, wegen des geringeren spezifischen Verbrauchs die günstigere Energiequelle darstellt, zumal sich die Spalter der GS-Studien zwar bei der Antriebsart, ansonsten aber wenig unterschieden (vgl. Anhang 11.1). Bei einem Preis von 1 €/l Dieselkraftstoff errechnet sich zwar mit 0,10 €/kWh ein relativer Endenergie-Preisvorteil gegenüber Strom (ca. 0,25 €/kWh), durch den deutlich höheren Dieselverbrauch wird dieser aber mehr als ausgeglichen. Beispielsweise betragen die Energiekosten selbst für den Waagerechtspalter mit 0,50 €/Fm noch mehr als das 5-fache des stromangetriebenen Prozesses (ca. 0,10 €/kWh), sie steigen auf mehr als das 15-fache beim Senkrechtspalter in der Studie GS 2 (1,50 €/Fm). Die Rahmenbedingungen der Messungen sind in den Verfahrenssteckbriefen in Anhang 11.1 zusammengestellt.

Tabelle 24: Energieverbrauch bei den großen Senkrecht- und Waagerechtspaltern umgerechnet auf kWh (1 Liter Diesel ≡ 10 kWh)

Teilstudie	Baumart	Energieträger	Mittlere Leistungsaufnahme (kW)	Spezifischer Energieverbrauch	
				kWh/Fm	in kWh/Rm[a]
GS 6	Buche	Strom	0,89	0,39	0,20
GS 2	Buche	Dieselkraftstoff	23,0	15,4	7,78
GS 1	Fichte	Dieselkraftstoff	23,7	13,8	7,67
GS 3	Fichte	Dieselkraftstoff	17,2	9,8	5,44
WS 1	Fichte	Dieselkraftstoff	12,1	5,1	2,83

[a] Umrechnung der Raummaße nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.6.1); hier: Meterscheite, gespalten, gestapelt

5.4.4 Dieselverbrauch bei der kombinierten Säge-Spaltmaschine

Da Eingriffe in die Starkstromverkabelung für eine Verbrauchsmessung hier nicht durchgeführt werden konnten, handelt es sich bei den beiden gemessenen kombinierten Säge-Spaltmaschinen nur um dieselkraftstoffbetriebene Geräte. Tabelle 25 zeigt Ergebnisse dieser Verbrauchsmessungen. Auf Grund der vergleichsweise uneffektiven Arbeitsgestaltung (vgl. Kapitel 5.2.5) sind diese Werte jedoch nicht ohne weiteres verallgemeinerungsfähig. Sie zeigen jedoch, dass mit zunehmendem Mechanisierungsgrad im Vergleich zu den großen Senkrecht- und Waagerechtspaltern (Tabelle 24) auch nennenswerte Energieeffizienzsteigerungen verbunden sind, zumal hier die beiden Arbeitsgänge Sägen und Spalten gemeinsam erledigt werden. Die Rahmenbedingungen der Messungen sind in den Verfahrenssteckbriefen in Anhang 11.1 zusammengestellt.

Tabelle 25: Gemessener Dieselkraftstoff(DK)-Verbrauch bei kombinierten Säge-Spaltmaschinen

Teilstudie	Baumart	DK-Verbrauch (l/h)	Spezifischer DK-Verbrauch	
			kWh/Fm	kWh/Rm[a]
KK 3 & 4	Fichte	8,77	5,53	3,07
GK 3	Fichte	9,95	2,03	1,13

[a] Umrechnung der Raummaße nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.6.1); hier: Meterscheite, gespalten, gestapelt

5.4.5 Stromverbrauch beim Einsatz der Brennholzkreissäge

Bei der Stromverbrauchsmessung des Ablängens mit der Brennholzkreissäge wurden zwei unterschiedliche Ausgangssortimente verarbeitet. Bei den Teilstudien KR 2 und 3 handelte es sich um ungespaltene Meterstücke und bei den Teilstudien KR 1, 4 und 5 um gespaltene Meterscheite (siehe Tabelle 26). Wegen der größeren Schnittflächen war bei den ungespaltenen Ausgangssortimenten ein größerer Energieverbrauch als bei den gespaltenen erwartet worden. Dies konnte jedoch nicht bestätigt werden. Dagegen liegt der um ca. 31 % höhere spezifische Stromverbrauch

beim Ablängen des härteren Buchenholzes verglichen mit dem weicheren Fichtenholz im Rahmen der Erwartungen. Die Rahmenbedingungen der Messungen sind in den Verfahrenssteckbriefen in Anhang 11.1 zusammengestellt.

Tabelle 26: Ergebnisse der Stromverbrauchsmessung beim Ablängen von Meterscheiten auf 33 cm Scheite mit der Brennholzkreissäge

Teilstudie	Baum-art	Aufberei-tungsform	Mittlere Leistungs-aufnahme (kW)	Spezifischer Stromverbrauch	
				kWh/Fm	kWh/Rm[a]
KR 2	Fichte	ungespalten	1,13	0,66	0,37
KR 3	Buche	ungespalten	1,17	0,84	0,42
KR 4	Fichte	gespalten	1,35	0,56	0,31
KR 5	Buche	gespalten	0,91	0,83	0,42
KR 1	Fichte	gespalten	1,07	0,69	0,38
Mittelwert:	Fichte	beides	1,18	0,64	0,35
Mittelwert:	Buche	beides	1,04	0,84	0,42

[a] Umrechnung der Raummaße nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.6.1); hier: Meterscheite, gespalten, gestapelt

5.4.6 Tatsächliche Leistungsaufnahme elektrisch betriebener Geräte

Am Beispiel der Kreissäge lassen sich die Verhältnisse bei der Leistungsaufnahme elektrisch betriebener Geräte verdeutlichen. Im Schnitt lag die verwendete Leistung bei der Kreissäge, deren Motor eine Nennleistung von 4,0 kW aufwies (vgl. Anhang 11.1) bei 1,11 kW (siehe Tabelle 26; Mittelwert aus Buche und Fichte). Dies ergibt einen mittleren Auslastungsfaktor von 0,28. Der Faktor lässt sich durch die längeren Leerlaufzeiten, die solche Geräte im Einsatz aufweisen, erklären; sie entstehen beim Holen und Ablegen des Holzes. Außerdem wird auch unter Last nicht immer die volle Leistung benötigt.

Als weiteres Beispiel können die Ergebnisse vom Spalten mit dem kleinen Senkrechtspalter herangezogen werden, hier lag die elektrische Leistungsaufnahme bei 0,64 kW (siehe Tabelle 22). Bei einer Nennleistung von 3,0 kW errechnet sich ein Auslastungsfaktor von 0,21. Beim großen Senkrechtspalter ergab die Messung der Leistungsaufnahme einen Wert von 0,89 kW (siehe Tabelle 24) was einen Auslastungsfaktor von 0,22 ergibt (maximale Nennlast: 4,0 kW). Im Mittel kann somit beim Sägen und Spalten von einer maximal ca. 25%igen Ausschöpfung der Maximalleistung ausgegangen werden.

Diese Berechnungen erlauben eine Abschätzung der mittleren Leistungsaufnahme bei den übrigen elektrisch betriebenen Geräten, die – wegen der hierfür erforderlichen Eingriffe in die Starkstromelektrik – nicht im Rahmen der Untersuchung direkt gemessen werden konnten. Es handelt sich hierbei um zwei der drei kombinierten Sägespaltmaschinen. Legt man den oben genannten mittleren Auslastungsfaktor von 0,25 auch bei diesen Geräten zu Grunde, so errechnet sich für die kleine kombinierte Maschine bei einer maximalen elektrischen Leistung von 7,5 kW eine tatsächliche Leistungsaufnahme von 1,88 kW. Bei der großen elektrisch betriebenen kombinierten Maschine

lag die maximalen Leistung bei 40 kW, so dass hier von einer mittleren tatsächlichen Leistungsaufnahme von 10 kW ausgegangen werden kann. Diese solchermaßen abgeschätzten Werte werden auch in den Berechnungen zum aggregierten Gesamtenergieeinsatz im Rahmen der Prozesskettenanalyse verwendet (vgl. Kapitel 6.2.4).

5.5 Trocknungsverlauf und Verluste bei der Lagerung

5.5.1 Jahreszeitliche Einflüsse

Bei im Winter abgelegtem frisch geschnittenem Meterscheitholz setzt die Trocknung schon unmittelbar nach Lagerbeginn ein, obgleich die Trocknungsbedingungen noch relativ ungünstig sind. Im Frühjahr kommt es zu einer Beschleunigung der Trocknung (gemessen in Wassergehaltsprozenten), die dann mit Zunahme der Bindungskräfte für die verbleibende Restfeuchte bei weiter verbesserten Trocknungsbedingungen im Sommer abflacht. Dieser charakteristische Verlauf ist in Abbildung 89 dargestellt. Dabei handelt es sich um eine besonders häufige Lagervariante, bei welcher der Holzstoß im Freien aufgebaut ist und vor Niederschlägen von oben durch eine Abdeckung geschützt ist. Unter den beschriebenen Bedingungen werden hier schon bis zum Sommer nach ca. 6-monatiger Lagerung ofenfertige Trocknungszustände erreicht. Das gilt für alle drei untersuchten Holzarten Buche, Fichte und Kiefer (Abbildung 89). Allerdings ist zu erwähnen, dass es sich im Jahr 2003 um einen besonders trockenen Sommer handelte (vgl. Kapitel 5.5.2). Außerdem waren die Wassergehalte der einzelnen Baumarten zu Trocknungsbeginn holzartenbedingt nicht ganz einheitlich, sie wiesen Unterschiede von ca. 5 Prozentpunkten auf.

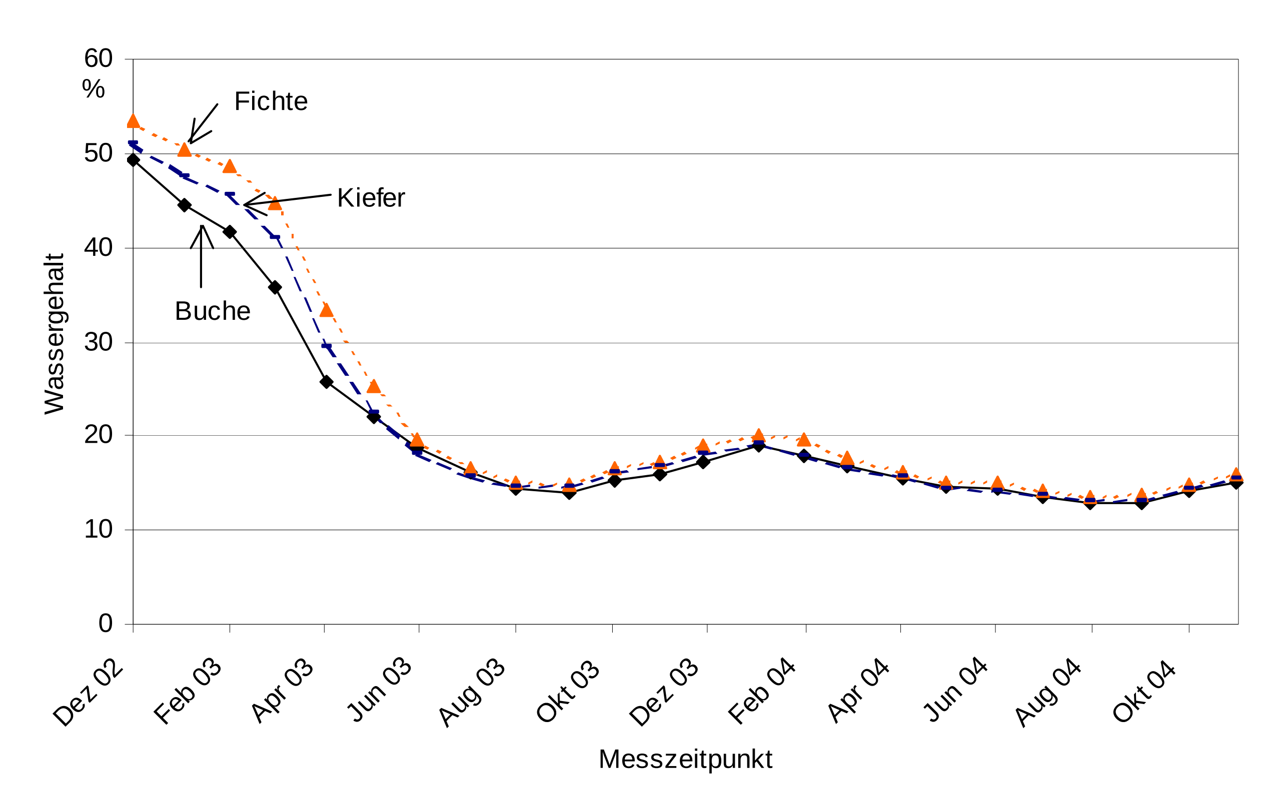


Abbildung 89: Wassergehaltsverlauf bei der Lagerung der verschiedenen Holzarten. Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten, Standort: Freising

Im weiteren Verlauf ab Ende September steigt der Wassergehalt im Holz bis Januar wieder leicht an auf nahezu 20 %. Auch hierin besteht Übereinstimmung bei den untersuchten Holzarten. Im zweiten Jahr folgt die erneute Abtrocknung entsprechend der Gleichgewichtsfeuchte, die sich zwischen dem Trocknungsgut und der Atmosphäre einstellt. Allerdings ist die dann erreichte End-

feuchte noch mal um ca. einen Prozentpunkt geringer als im ersten Jahr, obgleich es sich in 2004 um einen deutlich feuchteren Sommer handelte (siehe auch Kapitel 5.5.3). Auf Trockenmasseverluste durch biologischen Abbau kann diese zusätzliche Abtrocknung nicht zurückgeführt werden, da in den Werten in Abbildung 89 eine Korrektur der Wiegungen um die Verluste bereits enthalten ist (zur Verlustkorrektur vgl. Kapitel 5.5.6).

Trotz weitgehender Übereinstimmung sind zwischen den Baumarten auch Unterschiede im Trocknungsverlauf zu erkennen. In den Wintermonaten Dezember bis Februar 2003 verlor die Buche am schnellsten ihre Feuchtigkeit, um nach vier Monaten Lagerungszeit im März mit 35 % Wassergehalt einen Vorsprung im Trocknungsverlauf gegenüber der Kiefer mit 41 % und der Fichte mit 45 % Wassergehalt zu erreichen. Ab April werden bei allen Baumarten höchste Trocknungsraten von monatlich bis zu 90 Liter pro Raummeter erreicht (siehe unten: Abschnitt Trocknungsraten). Bis Juni wird der Trocknungsvorsprung der Kiefer und Buche von der Fichte wieder eingeholt (Abbildung 89).

Die in Abbildung 89 dargestellten Ergebnisse zeigen deutlich, dass für die hier gegebenen Trocknungsbedingungen eine Lagerdauer von einem Jahr ausreicht, um den für eine optimale Verbrennung von Scheitholz geforderten lufttrockenen Zustand (bis 20 % Wassergehalt) zu erreichen. Das wird auch durch die Ergebnisse für den zweiten Lagerversuch mit Lagerbeginn im November 2003 bestätigt (vgl. hierzu Kapitel 5.5.2). Das Buchenholz trocknet zwar in den Sommermonaten ein wenig langsamer als Fichten- oder Kiefernholz, dies wird aber durch ein besseres Trocknungsverhalten in den Wintermonaten und einen besseren Startwert für den Wassergehalt im waldfrischen Zustand ausgeglichen. In absoluten Zahlen ausgedrückt wäre allerdings das Buchenholz gegenüber der Fichte oder Kiefer bei gleichem Startwert sogar leicht im Nachteil: mit 45 % Wassergehalt enthält ein Raummeter aus gespaltenen Meterscheiten frischen Buchenholzes 280 Liter Wasser, ein Raummeter mit 50 % Wassergehalt Fichtenholz dagegen nur 240 Liter. Zur vollständigen Abtrocknung auf einen Wert von 15 % Wassergehalt sind somit bei Buchenholz 218 Liter abzutrocknen und bei Fichtenholz 198 Liter Wasser.

Trocknungsraten. Da sich am zeitlichen Verlauf der Wassergehalte die tatsächlich abgegebene Wassermasse je Volumeneinheit und damit die Trocknungseffizienz nicht abschätzen lässt, soll nachfolgend die tatsächliche monatliche Gewichtsveränderung als Trocknungsrate mit absoluten Zahlen dargestellt werden. Damit lässt sich das passive Trocknen von Scheitholz stärker zeitlich differenziert charakterisieren. Auch für diese Darstellung wird wieder die in Abbildung 89 dargestellte Lagervariante mit abgedeckten Scheitholzbündeln (hier exemplarisch nur für Fichte und Buche) gewählt, wobei eine Beschränkung auf eine einjährige Lagerdauer vorgenommen wird.

Abbildung 90 zeigt die Trocknungsraten während des ersten Lagerversuchs von Dezember 2002 bis Dezember 2003. Darin wird ersichtlich, dass das Buchenholz über die Wintermonate Januar bis März mit durchschnittlich 53 l pro Rm und Monat mehr Feuchtigkeit als die Fichte mit durchschnittlich 34 l pro Rm und Monat verliert. Im April ist die Trocknungsrate bei beiden Baumarten am höchsten (Buche: monatlich 80 l/Rm, Fichte: monatlich 93 l/Rm), sie sinkt dann wegen der geringeren verbliebenen Restfeuchte bis September auf Null ab. Die anschließende Wiederaufnahme von Wasser aus der Atmosphäre und eventuell durch Schlagregen beträgt zwischen Oktober und Dezember durchschnittlich ca. 5 l/Rm monatlich.

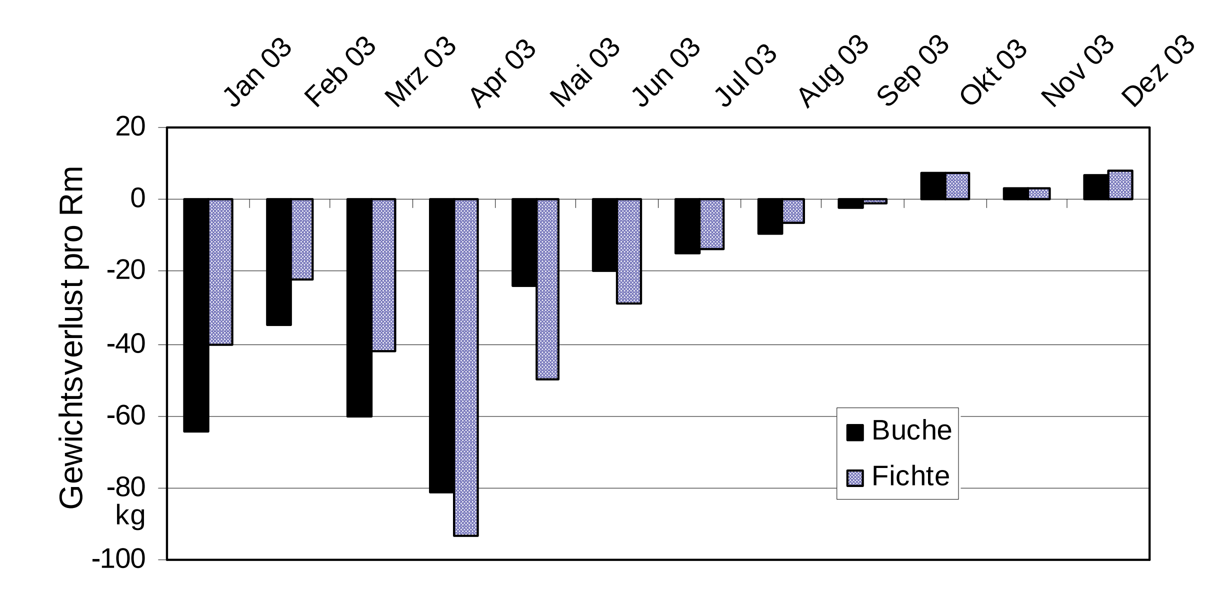


Abbildung 90: Trocknungsrate in Litern bzw. kg Wasser pro Monat bei frisch eingelagerter Buche und Fichte im 1. Versuchsjahr (2003). Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten, Standort: Freising

Um diese Aussage auch hinsichtlich möglicher saisonaler Besonderheiten (trockene/feuchte Jahre) beurteilen zu können, werden die Trocknungsraten in Abbildung 91 auch für den zweiten Lagerungsversuch (ein Jahr zeitversetzt) dargestellt. Darin zeigt sich, dass die beobachteten Unterschiede für die Holzarten auch unter anderen Klimabedingungen wiederholbar sind. Auch hier ist der absolute Wasserverlust der Buche in den ersten drei Monate höher als bei der Fichte.

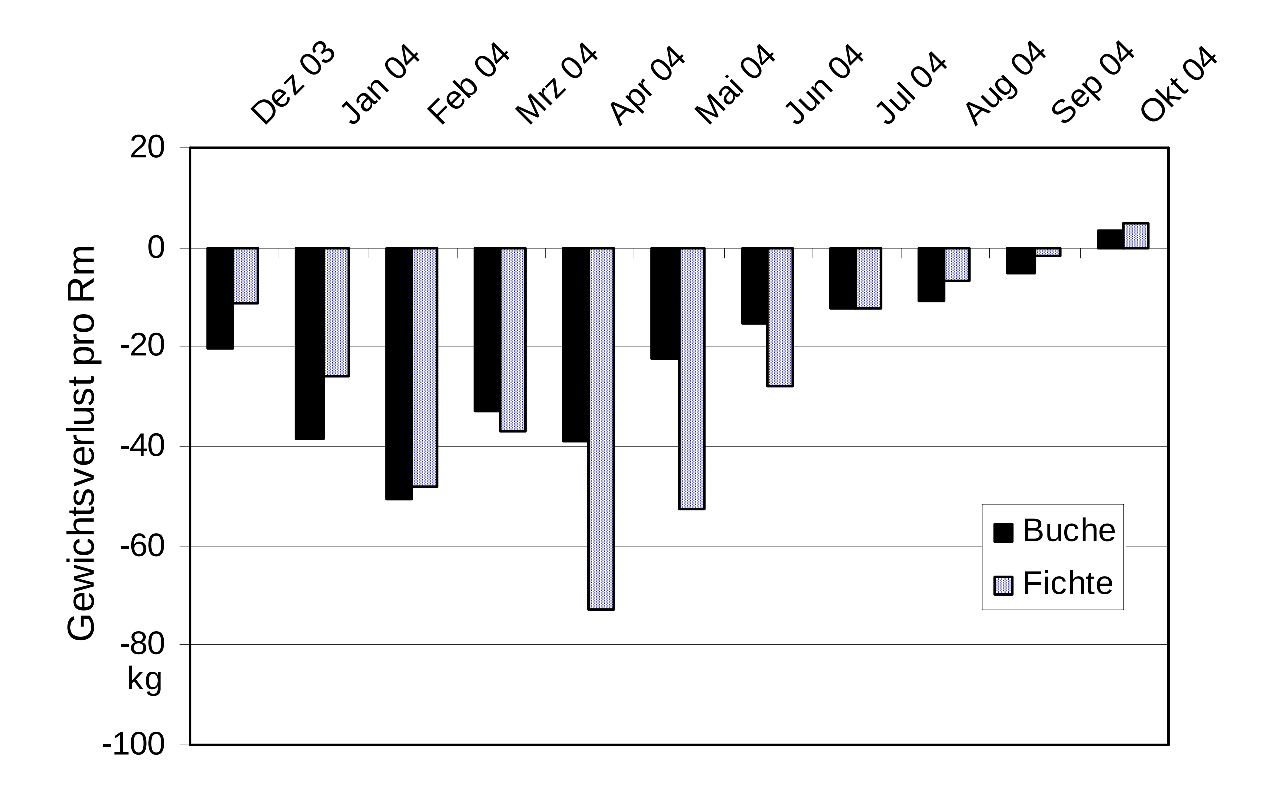


Abbildung 91: Trocknungsrate in Litern bzw. kg pro Monat bei frisch eingelagerter Buche und Fichte im 2. Versuchsjahr (2004). Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten, Standort: Freising)

Inwieweit die Unterschiede im Trocknungsverhalten der Holzarten auf strukturelle und dichtebedingte Unterschiede zurückzuführen sind, ist unklar. Bei diesen Eigenschaften unterscheiden sich die Holzarten stark (z. B. Rohdichte Fichte 0,43 g/cm³, Rohdichte Buche 0,68 g/cm³ [39]. Generell ist jedoch festzustellen, dass Fichtenbrennholz – entgegen der allgemeinen Auffassung – nicht schneller trocknet als Buchenholz, sondern dass Buche phasenweise sogar einen Trocknungsvorsprung besitzt. Wenn – wie allgemein üblich – eine vollständige Sommerperiode für die Trockenlagerung aufgewendet wird und für die Lagerung günstige Trocknungsbedingungen eingerichtet werden, bleiben diese Unterschiede für den Verbraucher ohne Auswirkung, zumal die von den Feuerungsanlagenherstellern geforderte Marke von maximal 20 % Wassergehalt bei beiden Holzarten bis zum Herbst deutlich unterschritten wird.

Die hohen absoluten Wassermengen von bis über 80 l Wasser, die unter günstigen Klimabedingungen in einem Monat je Raummeter aus Buchenscheitholz verdunsten können sind allerdings nur möglich, wenn der Brennstoff noch relativ frisch ist und das enthaltene Restwasser noch nicht allzu fest gebunden ist. Diese beiden limitierenden Faktoren für die Trocknung entwickeln sich in der hier vorliegenden Lagerperiode im Verlauf weitgehend gegenläufig. Auf welche unterschiedliche Weise das Wasser im Holz gebunden sein kann zeigt Tabelle 27. Dabei nehmen die Bindungskräfte, mit denen es in der organischen Masse "festgehalten" wird, von der Kapillarsorption über die Elektrosorption bis hin zur Chemosorption zu. Diese Bindungskräfte müssen durch die Trocknung überwunden werden.

Tabelle 27: Art der Wasserbindung im Holz (Quelle:[9])

Bindung	Wassergehalt (%)	Merkmale
Kapillarsorption und Adhäsion	> 25	feines, ungebundenes Wasser in den Zellhohlräumen, gebundenes Wasser in den Holzfasern
Fasersättigungs-punkt	19 – 25	Wasser in den Holzfasern gebunden, Holzschwund bei Wasserentzug
Kapillarsorption	13 – 25	kolloidal gebundenes Wasser, Feuchtigkeitsbewegung durch Diffusion und Kapillarkräfte
Elektrosorption	5,7 – 13	Wasser an der Micelle durch elektrische Kräfte gebunden
Chemosorption	0 – 5,7	molekulare Anziehungskräfte

5.5.2 Vergleich der Versuchsjahre 2003/2004 (Wettereinfluss)

Die Lagerversuche wurden am Standort Freising in zwei aufeinanderfolgenden Jahren wiederholt, um anhand zweier möglichst unterschiedlicher Wetterverläufe verallgemeinerungsfähige Aussagen treffen zu können. Die klimatischen Bedingungen und deren Auswirkungen werden nachfolgend beschrieben.

Wetterunterschiede in den beiden Versuchsjahren. In der Tat waren die Wetterverläufe der beiden Versuchsjahre sehr unterschiedlich. Verglichen mit dem rekordtrockenen Sommer 2003 kann das Sommerhalbjahr 2004 eher als kühl-feuchtes Jahr beschrieben werden. Das lässt sich auch anhand der entsprechenden lokalen Wetteraufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes aufzeigen, wobei die Wetterstation sich in unmittelbarer Nachbarschaft zum Versuchsstandort in Freising befand (ca. 500 m Luftlinie). Die entsprechenden Mittelwerte für Temperatur, Niederschlag und das Sättigungsdefizit der Luft sind speziell für die beiden Lagerperioden in Tabelle 28 zusammengestellt.

Tabelle 28: Klimadaten für die verschiedenen Lagerperioden der beiden Lagerversuche in Freising (Mittelwerte aus benachbarter Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes)

	Lagerperiode 1 Dez. ´02 bis Nov. ´03	Lagerperiode 2 Dez. ´03 bis Nov. ´04	langjähriges Mittel [4]
Mittlere Temperatur (°C)	8,8	8,2	7 – 8
Niederschlag (mm)	577	757	750 – 800
Sättigungsdefizit der Luft (hPa)	3,30	2,50	k.A.

Bei der Charakterisierung der Trocknungsbedingungen ist das Sättigungsdefizit die entscheidende klimatische Messgröße. Sie wird auch als "Dampfhunger" oder als Dampfdruckdifferenz bezeichnet und kann aus den beiden Messgrößen, der relativen Luftfeuchte und der Lufttemperatur, errechnet werden. Je größer das Sättigungsdefizit ist, desto größer ist das absolute Wasseraufnah-

mevermögen der Luft. Das Sättigungsdefizit war in 2003 deutlich höher als in 2004 (Tabelle 28), das gilt vor allem in den Monaten Juni bis August (Abbildung 92), wodurch deutlich bessere Trocknungsbedingungen für das lagernde Brennholz vorlagen.

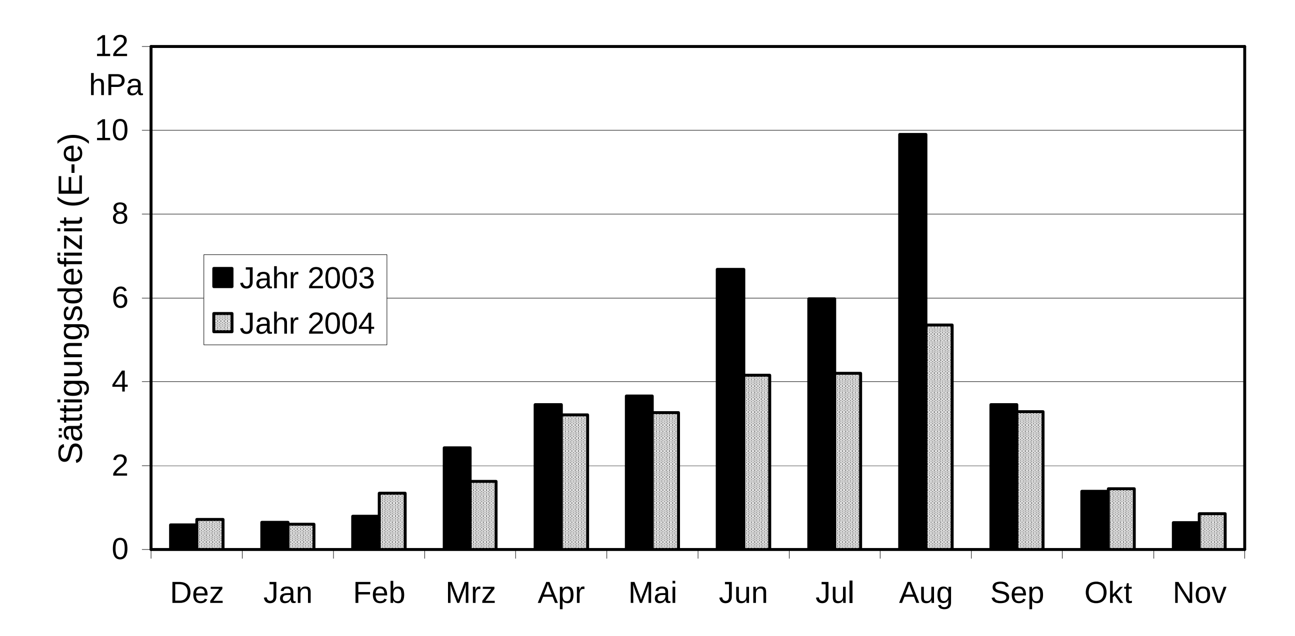


Abbildung 92: Vergleich der mittleren monatlichen Sättigungsdefizite der Luft (E-e) in Freising in den beiden Lagerungsperioden 2003 und 2004

Auch Niederschläge können den Wassergehalt von abgedeckten im Freien lagernden Holzstapeln beeinflussen. Die deutlichen Niederschlagsunterschiede zwischen den beiden Versuchsjahren zeigt Abbildung 93, sie sind besonders auffällig bei den trocknungsintensiven Monaten Juni, August und September.

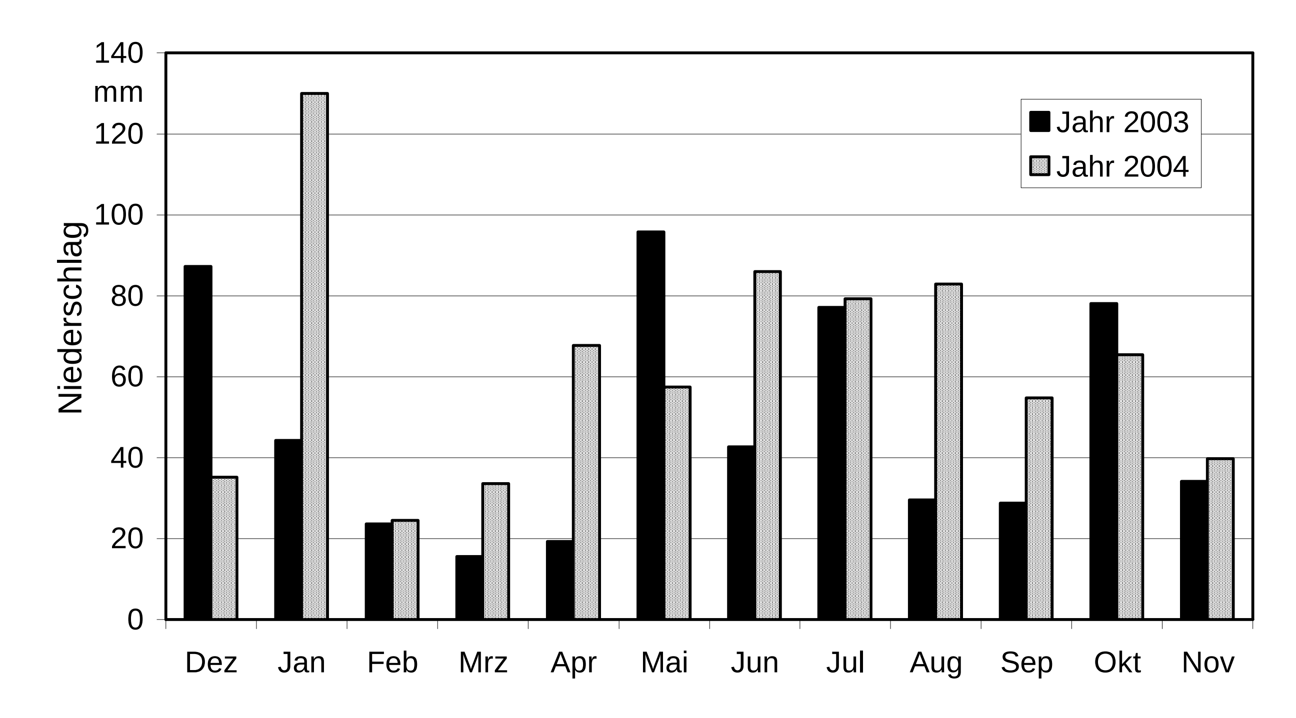


Abbildung 93: Vergleich der mittleren monatlichen Niederschläge in Freising in den beiden Lagerungsperioden 2003 und 2004

Jahresbedingte Trocknungsunterschiede. Zum Vergleich der beiden Versuchsjahre werden in Abbildung 94 und Abbildung 95 die Trocknungsverläufe beider Versuche gemeinsam dargestellt, wobei zur besseren Übersicht auf den Verlauf für Kiefernholz verzichtet wird, zumal hier große Ähnlichkeiten zum Fichtenholz bestehen (vgl. dazu Abbildung 89). Anders als in der ersten Lagerungsperiode ist der Ausgangswassergehalt der beiden Holzarten in der zweiten Lagerungsperiode mit 45 % (Buche) und 60 % (Fichte) deutlich unterschiedlich. Durch eine beschleunigte Trocknung im März kann die Fichte diesen Rückstand jedoch bis Juni mehr als kompensieren (Abbildung 94), so dass die Marke von 20 % danach von beiden Holzarten unterschritten ist. Das zeigen auch die ab April stark gestiegenen Trocknungsraten in Abbildung 91, die unter anderem durch die unterschiedlichen Restwassergehalte (unterschiedliche Bindungskräfte!) der Holzarten zu begründen sind. Das in 2004 erreichte Trocknungsniveau liegt jedoch – zumindest beim Buchenholz – leicht über dem im 2003 erreichten Niveau, was auf einen Jahreseinfluss hindeutet. Derartige Unterschiede sind vermutlich eher auf die unterschiedlichen Sättigungsdefizite zurückzuführen (Abbildung 92), prinzipiell kommen zusätzlich aber auch Niederschläge (Schlagregen) in Frage, zumal in den Sommermonaten 2004 hier deutliche Differenzen gegenüber 2003 auftraten (Abbildung 93).

Die Tatsache, dass die Endwassergehalte bis zum Spätsommer in beiden Jahren trotz deutlich unterschiedlicher Wetterverläufe sich kaum unterscheiden und in allen Fällen Wassergehalte von deutlich unter 20 % erreicht wurden, lässt darauf schließen, dass für günstige Lagerungsbedingungen eine Mindestlagerdauer von einem Jahr oder sogar nur einem Sommer ausreicht, um die geforderte Endfeuchte von "ofenfertigem" Holz zu erreichen. Das bedeutet aber auch, dass eine nach Holzarten differenzierte Festlegung der Mindestlagerdauer nicht erforderlich ist. Derartige Empfehlungen werden jedoch in der 1. Bundesimmissionsschutzverordnung (kommentierte Fas-

sung) gegeben (1. BImSchV, §3 (3)), darin wird als Faustregel vom Erreichen des lufttrockenen Zustands nach 1 Jahr (Pappel, Fichte), 1,5 Jahren (Linde, Erle, Birke), 2 Jahren (Buche, Esche, Obstbäume) bzw. 2,5 Jahren (Eiche) ausgegangen.

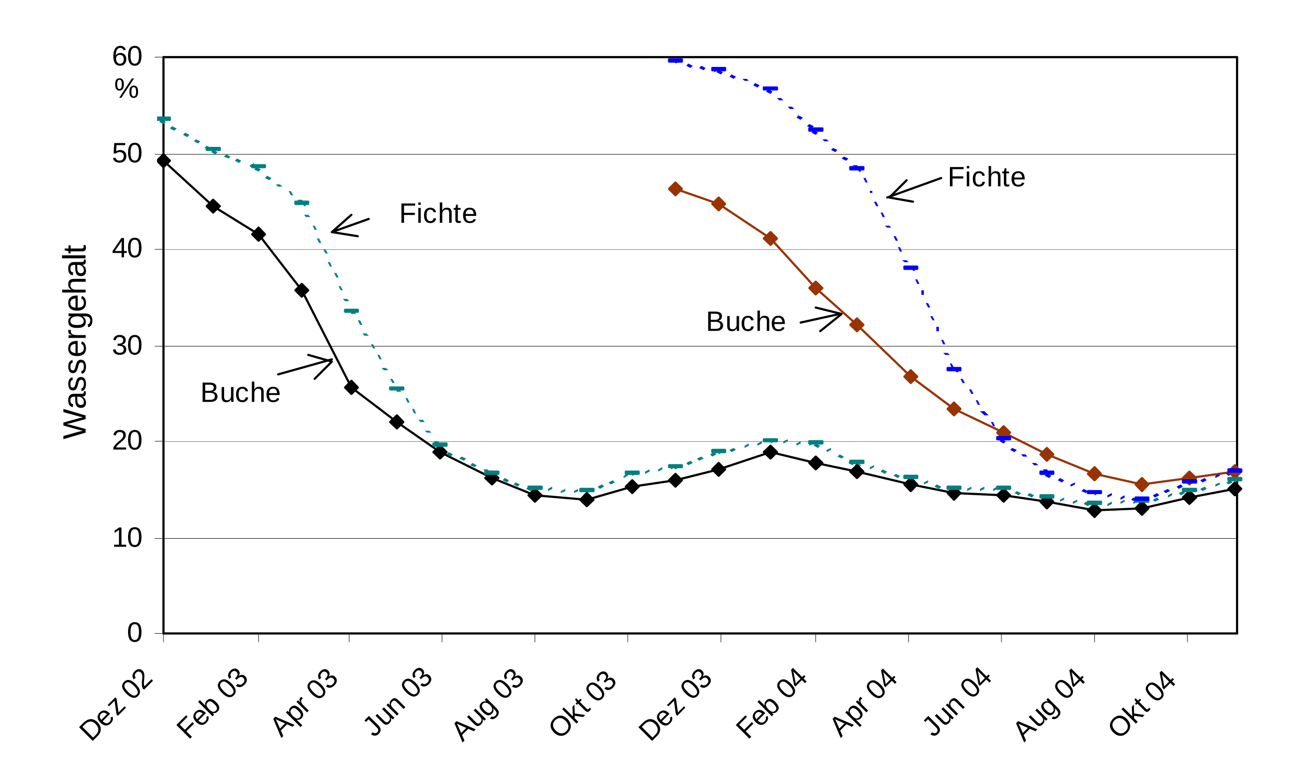


Abbildung 94: Gegenüberstellung der Wassergehaltsverläufe bei der Lagerung von Buche und Fichte in beiden Lagerperioden (Versuch 1 ab Dez. 2002, Versuch 2 ab Dez. 03), Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten, Standort: Freising)

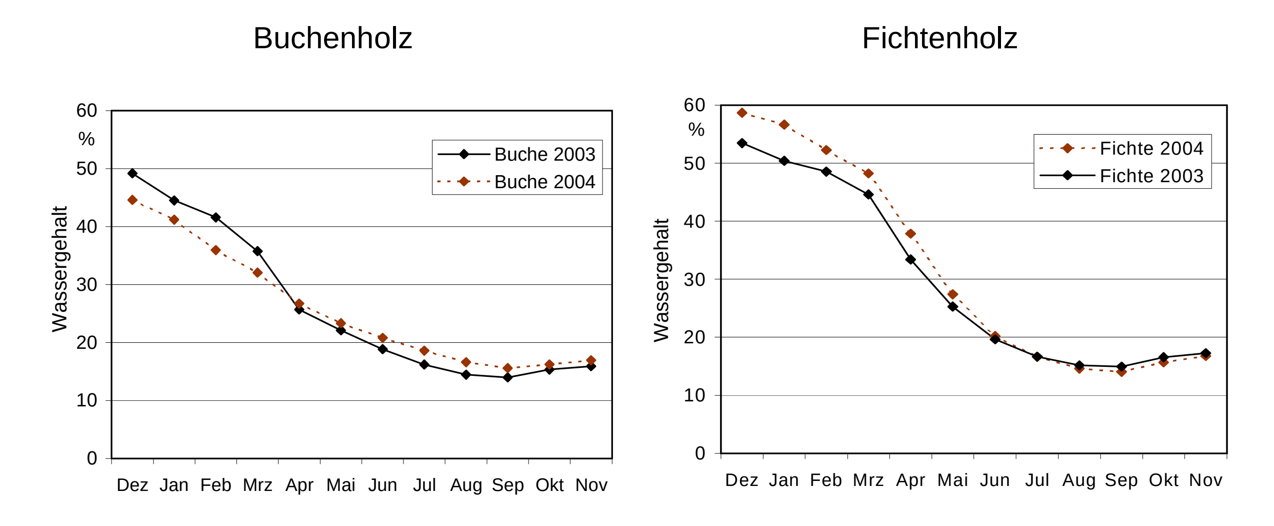


Abbildung 95: Direkter Vergleich der Jahreseinflüsse auf die Wassergehaltsverläufe beider Lagerungsversuche (Versuch 1 ab Dez. 2002, Versuch 2 ab Dez. 03), Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten, Standort: Freising

Die unterschiedlichen Startwerte für den Wassergehalt zwischen den Versuchsjahren spiegeln die üblichen zeitlichen, altersbedingten und standörtlichen Wassergehaltsschwankungen im frisch geschlagenen Holz wider. Allein zwischen den einzelnen Scheiten einer Holzcharge lagen im vorliegenden Versuch gemessene Wassergehaltsunterschiede von bis zu 20 %. Das zeigen die Auswertungen in Kapitel 5.5.6.

5.5.3 Einfluss des Lagerstandorts (Klima)

Zusätzlich zum vorangehend genannten Lagerungsstandort Freising (TUM Versuchsgut Dürnast) wurden in 2004 parallel weitere Lagerversuche im Allgäu (Kempten) durchgeführt, um anhand zweier möglichst unterschiedlicher Klimata verallgemeinerungsfähige Aussagen treffen zu können. Die für die Beurteilung der klimatischen Lagerungsbedingungen notwendigen Daten sind in Tabelle 29 zusammengestellt.

Tabelle 29: Klimadaten der beiden Lagerungsstandorte Freising und Kempten (Mittelwerte aus den monatlichen Daten des Deutschen Wetterdienstes)

	Freising	Kempten
Lagebeschreibung	Tertiäres Hügelland, nördlich von München	Voralpengebiet, Standort: Biomassehof Allgäu
Höhe über NN (m)	450	650
Mittlere Temperatur (°C)		
Dez. 02 bis Nov. 03:	8,8	8,4
Dez. 03 bis Nov. 04:	8,2	7,7
Niederschlagssumme (mm)		
Dez. 02 bis Nov. 03:	577	1024
Dez. 03 bis Nov. 04:	757	1118
Sättigungsdefizit der Luft (hPa)		
Dez. 02 bis Nov. 03:	3,30	2,95
Dez. 03 bis Nov. 04:	2,50	2,35

Die wesentlichen Unterschiede liegen vor allem im Niederschlag, der in Kempten um ca. 350 bis 500 mm über dem Freisinger Wert liegt, und in den niedrigeren Temperaturen in Kempten. In der Folge ist auch das Sättigungsdefizit der Luft, d. h. das Wasseraufnahmevermögen (vgl. Kapitel 5.5.2), verschieden, wobei im Jahresablauf vor allem der Augustwert hervorsticht (Abbildung 96).

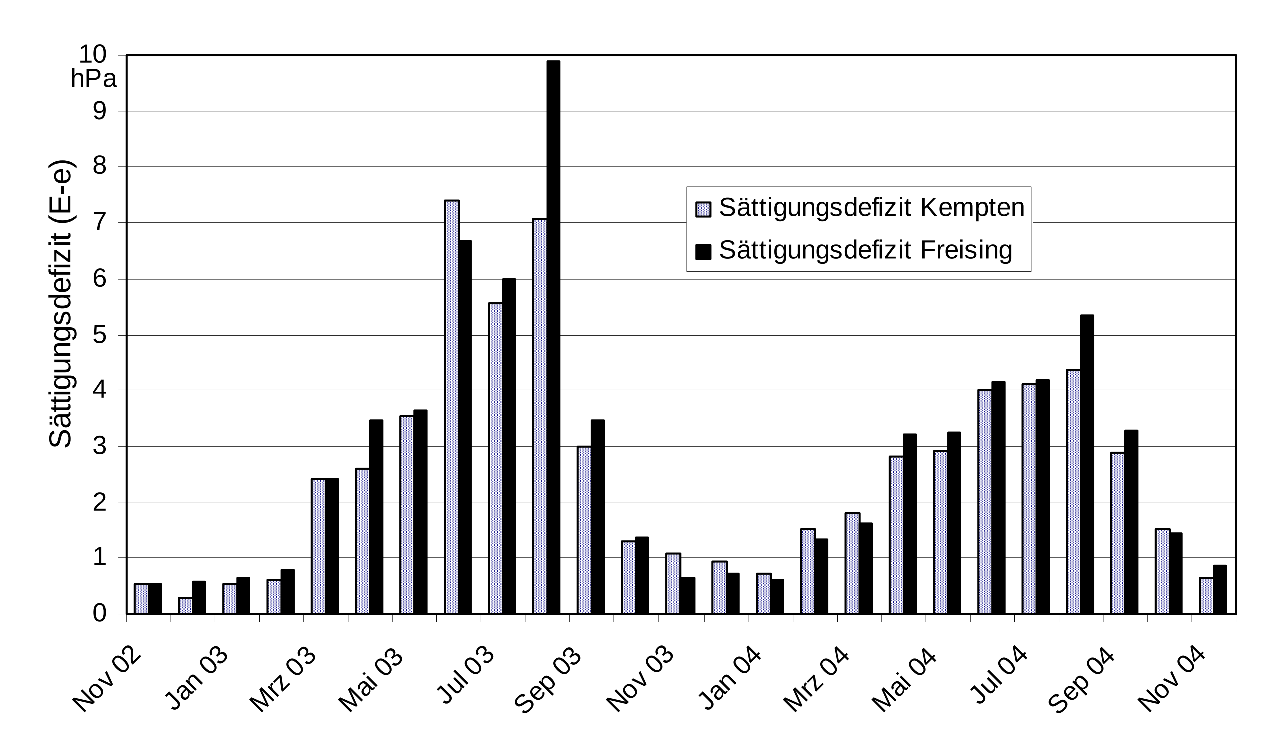


Abbildung 96: Vergleich und Verlauf des Sättigungsdefizits (Trocknungsvermögen) der Luft an den Standorten Kempten und Freising in den beiden Versuchsjahren

Direkter Vergleich des Trocknungsverlaufs Freising/Kempten. An beiden Standorten war im Jahr 2003 ein Abtrocknen des Holzes um bis zu 10 %-Punkte im Monat zu beobachten (Wassergehalt). In 2004 war dies nicht mehr möglich (Abbildung 97). Unterschiede zwischen den Standorten sind vor allem im Sommer zu erkennen, dann trocknen die Buchen-Scheitholzbündel in Kempten langsamer. Dafür nimmt das Holz aber im Verlauf der Wintermonate weniger Feuchtigkeit auf, so dass im Januar ein Gleichstand an beiden Standorte erreicht ist.

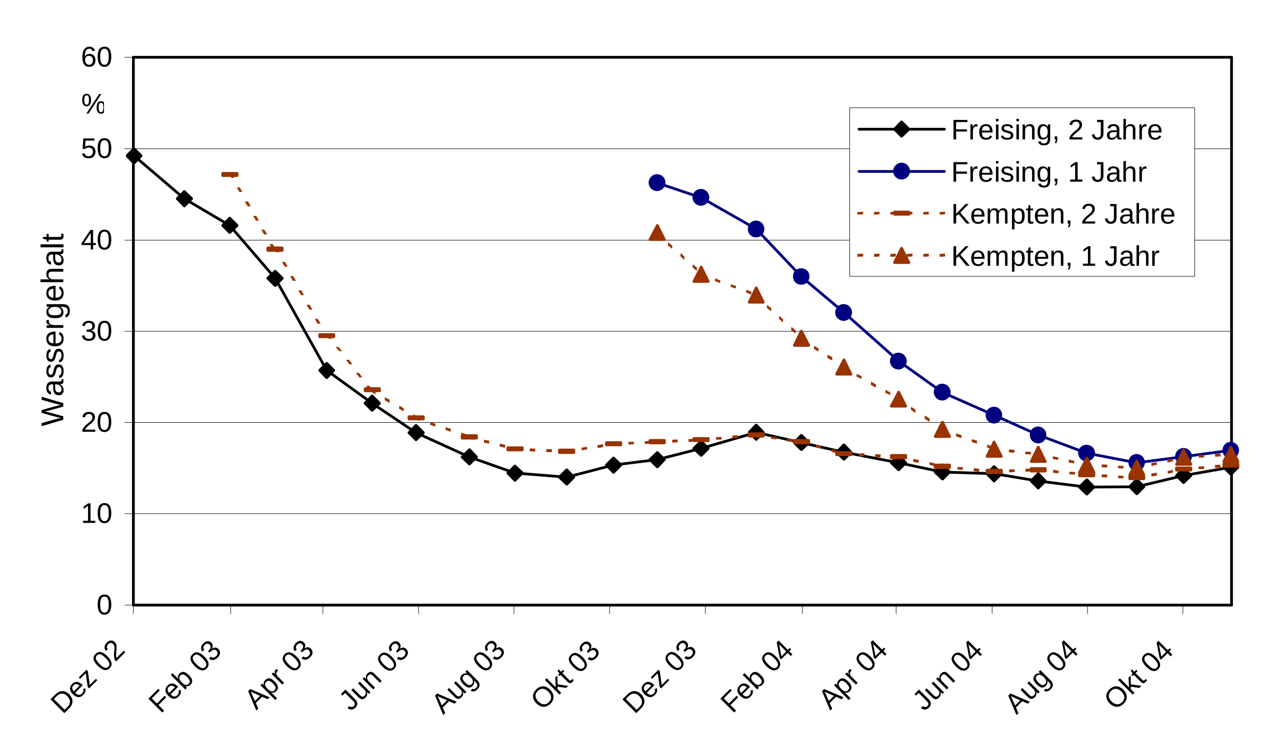


Abbildung 97: Vergleich des Trocknungsverlaufes von Buchenscheitholz an den Standorten Freising und Kempten. Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten

Von praktischer Bedeutung ist allerdings mehr die Beobachtung, dass an beiden Standorten bis zum Sommer – selbst mit der Hartholzart Buche – "ofenfertige" Trocknungszustände von unter 20 % Wassergehalt leicht erreichbar sind. Das gilt auch für das (hier nicht dargestellte) Fichtenholz. Die Standortunterschiede wirken sich kaum aus. Das Holz am Standort Kempten war im Jahr 2004 zum Zeitpunkt der Einlagerung schon gut einen Monat früher gefällt worden und hatte dadurch einen Vorsprung, es beginnt die Trocknung deshalb mit gut 40 % Wassergehalt und nicht wie in Freising mit 45 %. Die Frage, wann das Holz die 20 % Marke beim Wassergehalt unterschreitet, hängt folglich eher vom Ausgangswassergehalt als vom Lagerklima ab.

5.5.4 Einfluss der Aufbereitungs- und Lagerarten

Neben der in den voranstehenden Kapiteln angesprochenen Standardlagervariante des abgedeckten gespaltenen Meterholzes wurden an beiden Lagerstandorten in Freising und Kempten als weitere Varianten die geschütteten Kurzscheite in Gitterboxen sowie die Lagerung von ungespaltenen Rundlingen und die unabgedeckte bzw. die Unter-Dach-Lagerung untersucht. Die Auswertungen dieser Versuchsvarianten wird nachfolgend vorgestellt.

Geschüttete Kurzscheite in der Gitterbox. Bei dieser Aufbereitungs- und Lagerform trocknen die Holzscheite am schnellsten. Die 33 cm langen Scheite waren lose in die Gitterbox mit ca. 100 cm Schütthöhe eingefüllt und im Freien gelagert worden. In der abgedeckten Gitterbox erreichte das Holz schon im Mai die Marke von 20 % Wassergehalt (Abbildung 98), wobei zwischen den Baumarten Buche und Fichte kein deutlicher Unterschied im Trocknungsverhalten erkennbar ist. Die nicht abgedeckten Scheitholzpartien trockneten bis Januar praktisch nicht und

kamen erst im Juli unter 20 % Wassergehalt. Ohne Abdeckung kam es im weiteren Verlauf schon im Oktober wieder zum Überschreiten der 20 %-Marke beim Wassergehalt.

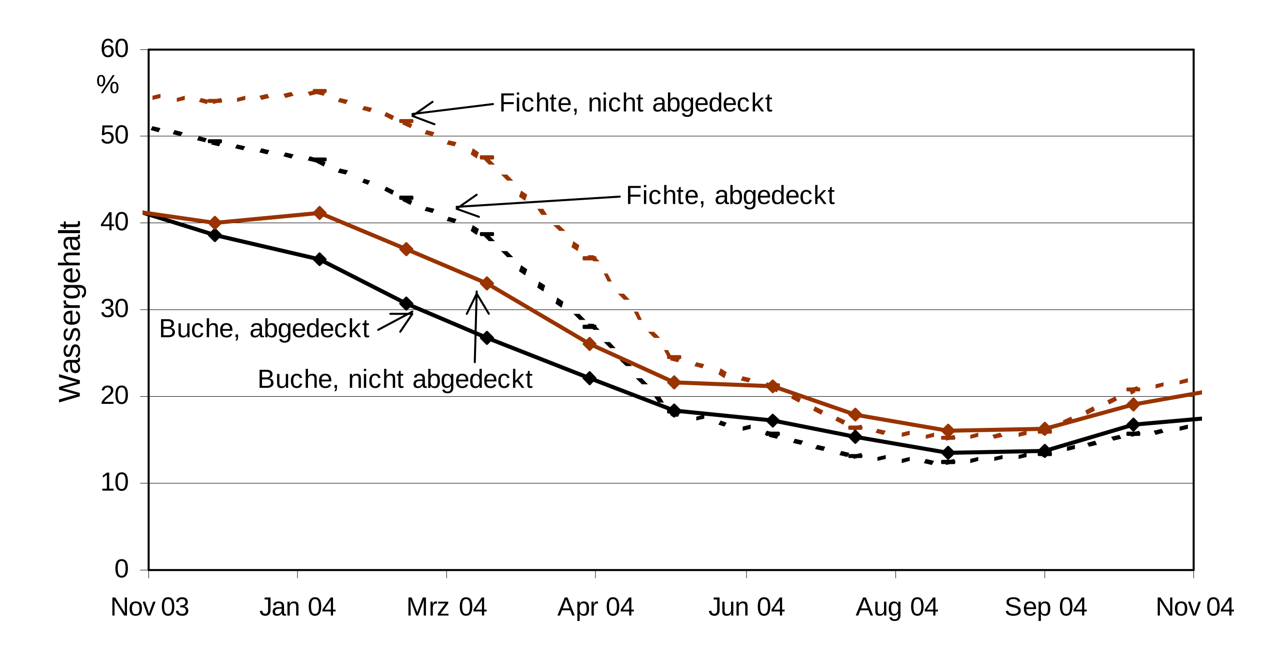


Abbildung 98: Wassergehaltsverlauf von gespaltenen 33 cm Scheiten (Buche/Fichte) bei abgedeckter und unabgedeckter Lagerung in Gitterboxen (geschüttet) in Freising im Jahr 2004

Die Ergebnisse in Abbildung 98 verdeutlichen, wie wichtig eine ganzjährige Abdeckung bei lose geschüttetem Scheitholz ist. Sie sollte spätestens im September erfolgen, andernfalls besteht die Gefahr, dass das Brennholz wieder zu viel Feuchtigkeit aufnimmt. Des weiteren wird deutlich, dass die 33-cm-Scheite, lose abgedeckt gelagert in einer Gitterbox, am schnellsten trocknen, denn zumindest die Buchenscheite erreichen schon im Mai des Jahres 2004 die 20 % Marke. Sie nehmen aber auch rascher wieder Feuchtigkeit auf, so dass im Endeffekt, d. h. zum Zeitpunkt des Verbrennens im Winter, kein Unterschied zu den übrigen Sortimenten erkennbar ist. Dies lässt sich durch die Tatsache erklären, dass die Feuchtigkeit vorrangig über die Stirnseiten der Scheite entweicht, und kurze Scheite ein besseres Verhältnis von Stirnseite zur Gesamtmasse des Scheites aufweisen. Abbildung 99 verdeutlicht, dass die bevorzugte Feuchtigkeitsbewegung im Holz der Längsrichtung der Holzzellen folgt, da hier weniger Barrieren überwunden werden müssen. Bei geringem Trocknungsvermögen der Luft und hoher Luftfeuchtigkeit im Herbst erweist sich diese Eigenschaft wieder als Nachteil, denn sie erleichtert auch die Wiederaufnahme von Feuchtigkeit.

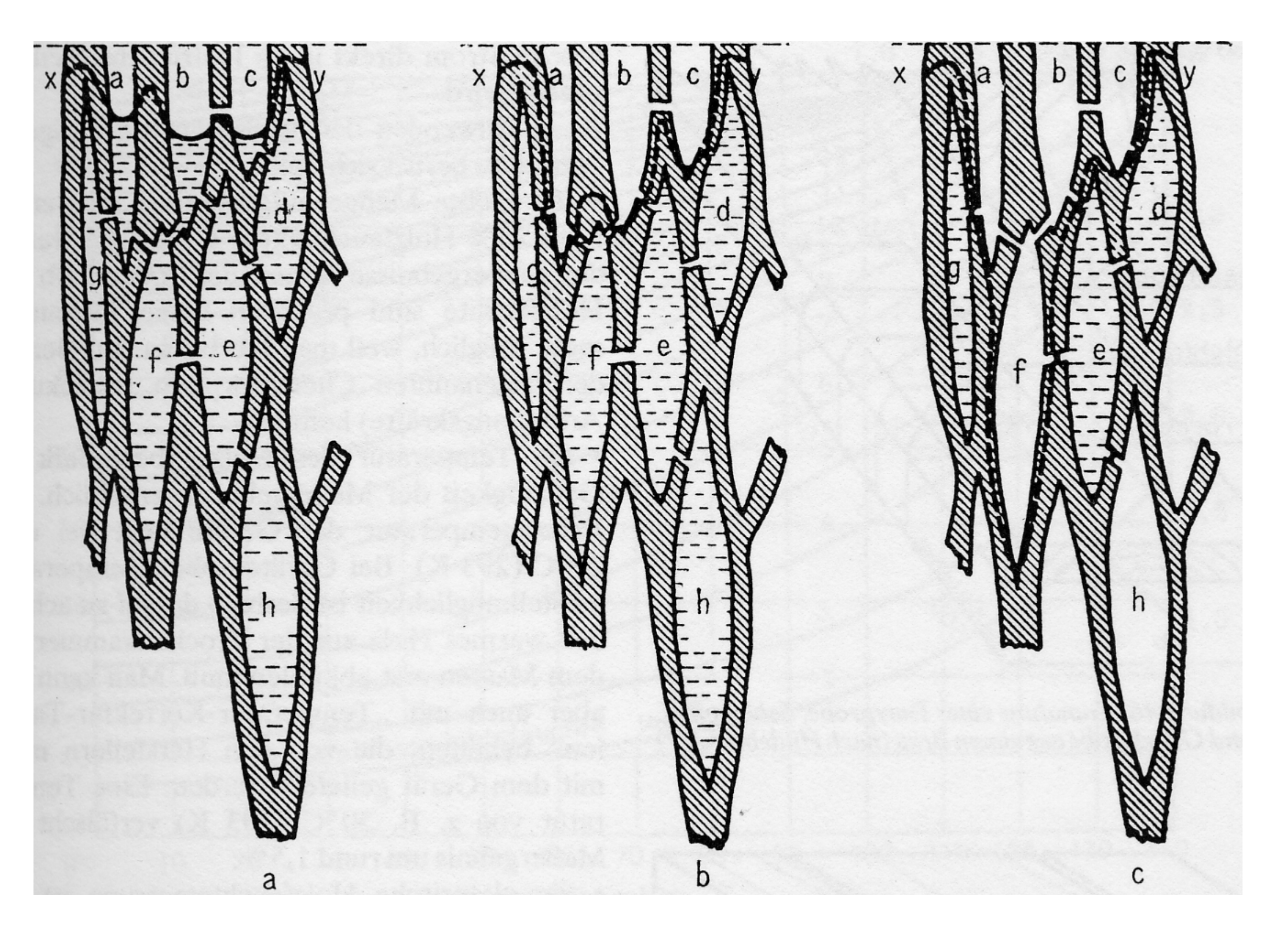


Abbildung 99: Schematische Darstellung der kapillaren Feuchtigkeitsbewegung in einem mikroskopischen Schnitt eines Koniferenholzes bei der Trocknung [39]; a: Anfangszustand eines frisch gefällten Holzes; b, c: Fortschritt der Trocknung im weiteren zeitlichen Verlauf

Vergleich gespalten/ungespalten. Aus einer einheitlichen Holzcharge wurde ein Teil des Holzes auch ungespalten eingelagert, wobei es ansonsten wie das gespaltene Holz in Bündeln zusammengeschürt war. Die Trocknungsverläufe sind in Abbildung 100 dargestellt. Darin sind die unterschiedlichen Wassergehalte zu Versuchsbeginn auf die hier gewählte Berechnungsweise zurückzuführen, bei der von den Endwassergehalten ausgehend über die Gewichtsveränderungen und den Verlustabzug auf den Ausgangswassergehalt geschlossen wurde (Kapitel 4.5). Zu Beginn der Lagerung im Dezember 2002 hat das gespaltene Holz in den Bündeln 45 % Wassergehalt und das ungespaltene Holz in den Bündeln ca. 47 % Wassergehalt (Abbildung 100). Von Anfang an trocknet das gespaltene Holz schneller als das ungespaltene Holz. Das unterschiedliche Trocknungsverhalten zeigt sich besonders deutlich bei der Erwärmung im Frühjahr (ca. April 2003). Zudem erreicht das gespaltene Holz im ersten Jahr mit 14 % einen niedrigeren Wassergehalt als die ungespaltenen Rundlinge mit 18 %, allerdings ist deren Wiederbefeuchtung in den Monaten Oktober bis Januar auch geringer. Nach spätestens ca. zwei Jahren sind die Unterschiede zwischen den Aufbereitungsarten ausgeglichen.

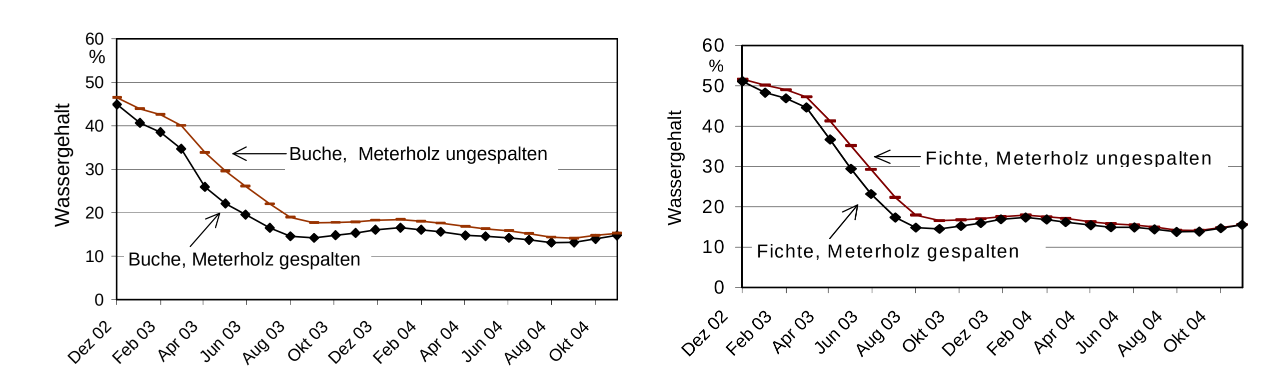


Abbildung 100: Vergleich der gespaltenen Meterscheite mit ungespaltenen bei Buchen und Fichte in Freising (innen gelagert)

Die unterschiedlichen Trocknungsverläufe lassen sich durch die unterschiedliche Größe der gesamten transpirierenden Holzoberflächen erklären. Bei der Versuchsdurchführung war darauf geachtet worden, dass die Stirnflächen pro Raummeter bei beiden Sortimenten ungefähr gleich groß waren. Die unterschiedlichen Trocknungsgeschwindigkeiten sind somit auch darauf zurückzuführen, dass auch über die Längsflächen Feuchtigkeit abgegeben wird. Bei Rundlingen bleibt das Holz dagegen durch die weitgehend unverletzte Rinde zusätzlich vor Austrocknung geschützt.

Aus den vorgestellten Ergebnissen ergibt sich die generelle Forderung nach einer längeren Lagerdauer für ungespaltene Meterscheite, allerdings kann unter geeigneten Bedingungen auch hier eine Lagerdauer von einem Jahr ausreichen. Die 2-jährige Lagerung führte im Versuch nicht zu einer sonst häufig beobachteten Verstockung des Holzes, das lässt auf optimale Lagerbedingungen (gute Luftzirkulation, Schutz vor Feuchtigkeit etc.) schließen.

Vergleich Lagerarten (innen/außen und abgedeckt/unabgedeckt). Im Winter von Dezember bis März ist bei unabgedeckter Außenlagerung nicht mit einer nennenswerten Trocknung zu rechnen; nur bei Innenlagerung oder abgedeckter Lagerung im Freien findet eine Abtrocknung statt (Abbildung 101), sofern, wie im vorliegenden Fall, ein gut durchlüfteter Standort gegeben ist. Die unabgedeckte Lagerung führt auch zu einer deutlich höheren Wiederaufnahme von Feuchtigkeit in der zweiten Winterperiode, dann ist mit 28 % zwischenzeitlich sogar ein mittlerer Wassergehalt gegeben, bei dem keine Eignung für eine direkte Brennstoffnutzung in Scheitholzfeuerungsanlagen mehr gegeben ist. Im Sommerhalbjahr kehrt sich dagegen die Situation teilweise um: von April bis September sind die außen gelagerten Scheitbündel trockener als die innen gelagerten.

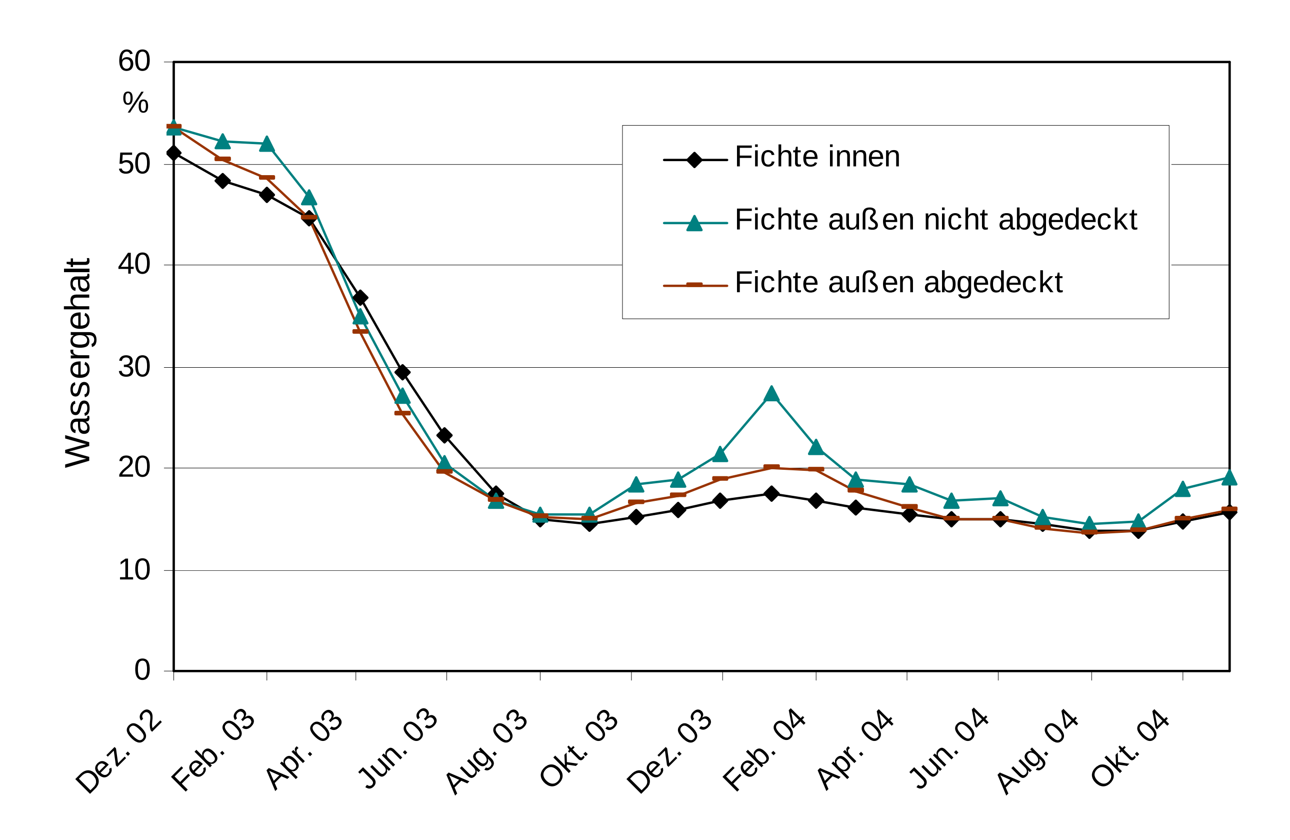


Abbildung 101: Vergleich der Lagerarten bei der Fichte am Standort Freising

Im feuchteren Klimabereich am Standort Kempten (vgl. Kapitel 5.5.3) sind die Unterschiede zum Teil noch stärker ausgeprägt, wenngleich der Beobachtungszeitraum dort um zwei Monate zeitversetzt beginnt (Abbildung 102). Auch hier führt eine fehlende Abdeckung bei Lagerung im Freien zu einer deutlichen Wiederaufnahme von Feuchtigkeit im Herbst und Winter, wodurch eine direkte Brennstoffnutzung in Scheitholzfeuerungsanlagen unmöglich wird. Auch im Sommer ist der Grad der Abtrocknung bei fehlender Abdeckung geringer als am Standort Freising. Generell kann festgestellt werden, dass ohne Abdeckung ein sicheres Erreichen eines ofenfertigen Trocknungsgrades nicht schon nach einem Jahr möglich ist.

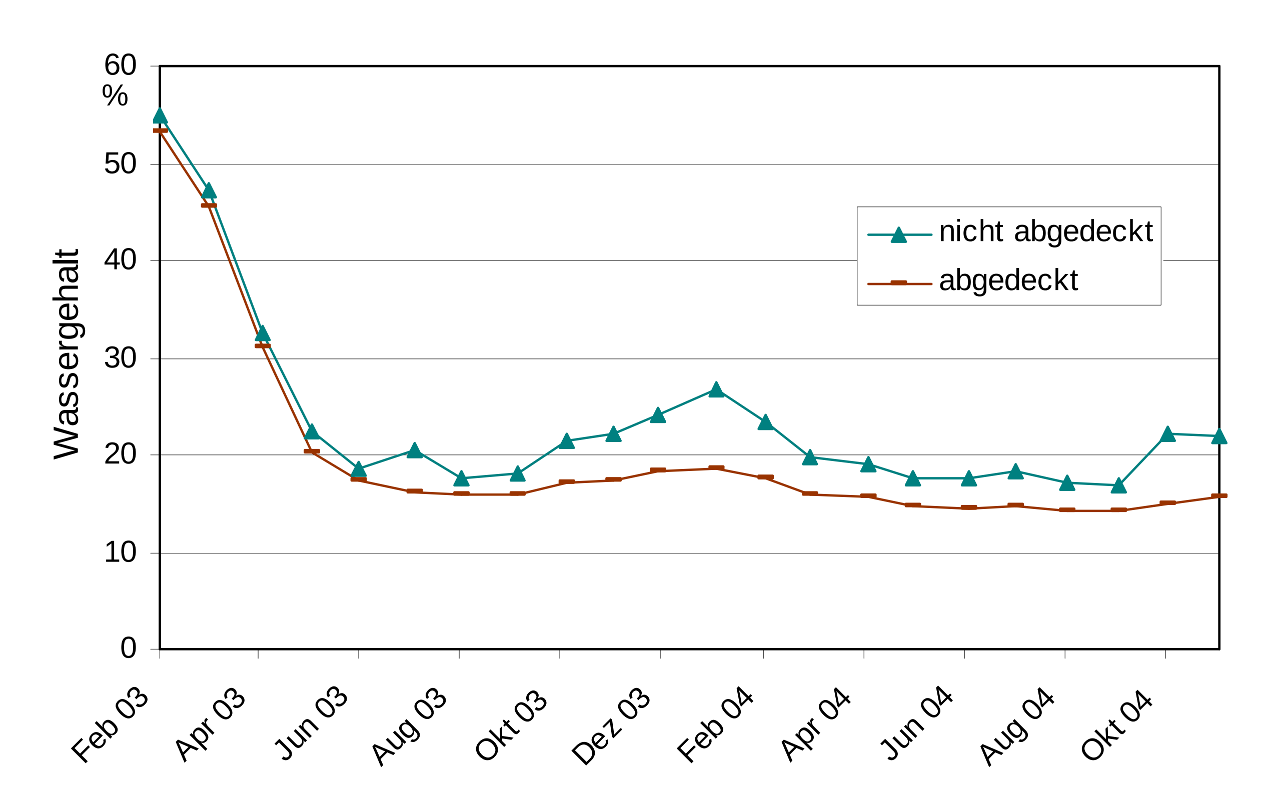
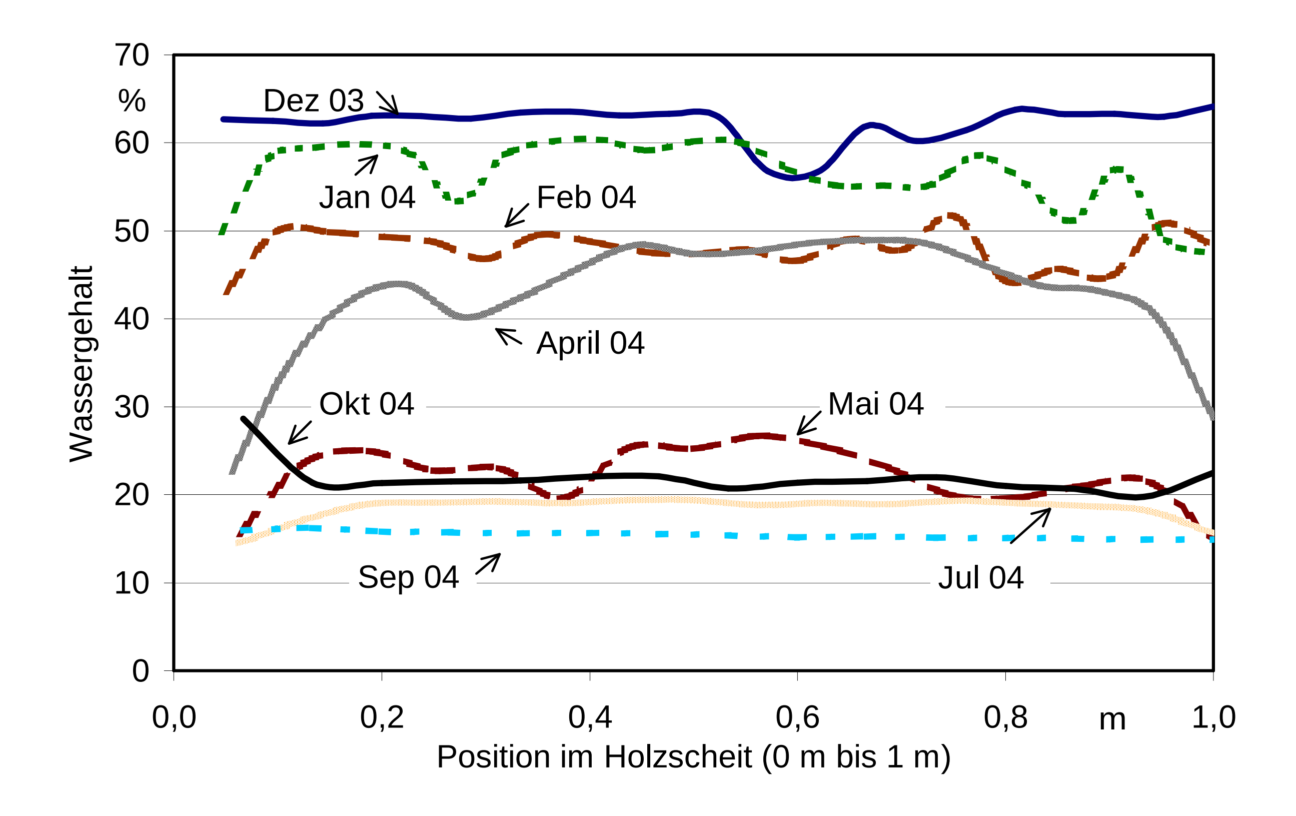


Abbildung 102: Vergleich der Lagerarten bei der Fichte am Standort Kempten

5.5.5 Wassergehaltsverlauf in einem Holzscheit im Jahresverlauf

In Abbildung 103 ist die Wassergehaltsverteilung in sieben verschiedenen Fichten- und Buchen-Meterscheiten dargestellt, wobei auch die Veränderung im Zeitablauf des Beobachtungsjahres 2004 erkennbar ist. Das Holz war im November 2003 geschlagen und sofort in Meterscheite gespalten worden (zur Methodik vgl. Kapitel 4.5.3). Schon im Dezember sind erste Trocknungsvorgänge erkennbar. Diese finden zunächst und vor allem an den Stirnseiten statt. Im Februar liegt der Wassergehalt – beispielsweise bei den Buchenscheiten – in der Mitte eines Meterscheites annähernd noch beim Anfangswassergehalt von 45 %, wohingegen die Seiten schon auf 35 % Wassergehalt abgetrocknet sind. Auch im März zeigt sich ein hoher Wassergehaltsgradient von der Mitte hin zu den Stirnseiten. Zum Ende der Trocknung im September bildet der Wassergehaltsverlauf annähernd eine Gerade. Da sich die Holzfeuchte nun in einem Gleichgewichtszustand mit der Atmosphäre befindet, finden keine Ausgleichsbewegungen mehr statt. Mit dem Einsetzen der feuchteren Herbstwitterung im Oktober wird erkennbar, dass die Wiederbefeuchtung von den Stirnseiten her einsetzt (Abbildung 103). Vor allem kurze Scheite müssen daher vor dem Herbst abgedeckt oder in einen überdachten Raum umgelagert werden, wenn sie schon in der folgenden Heizsaison verwendet werden sollen.



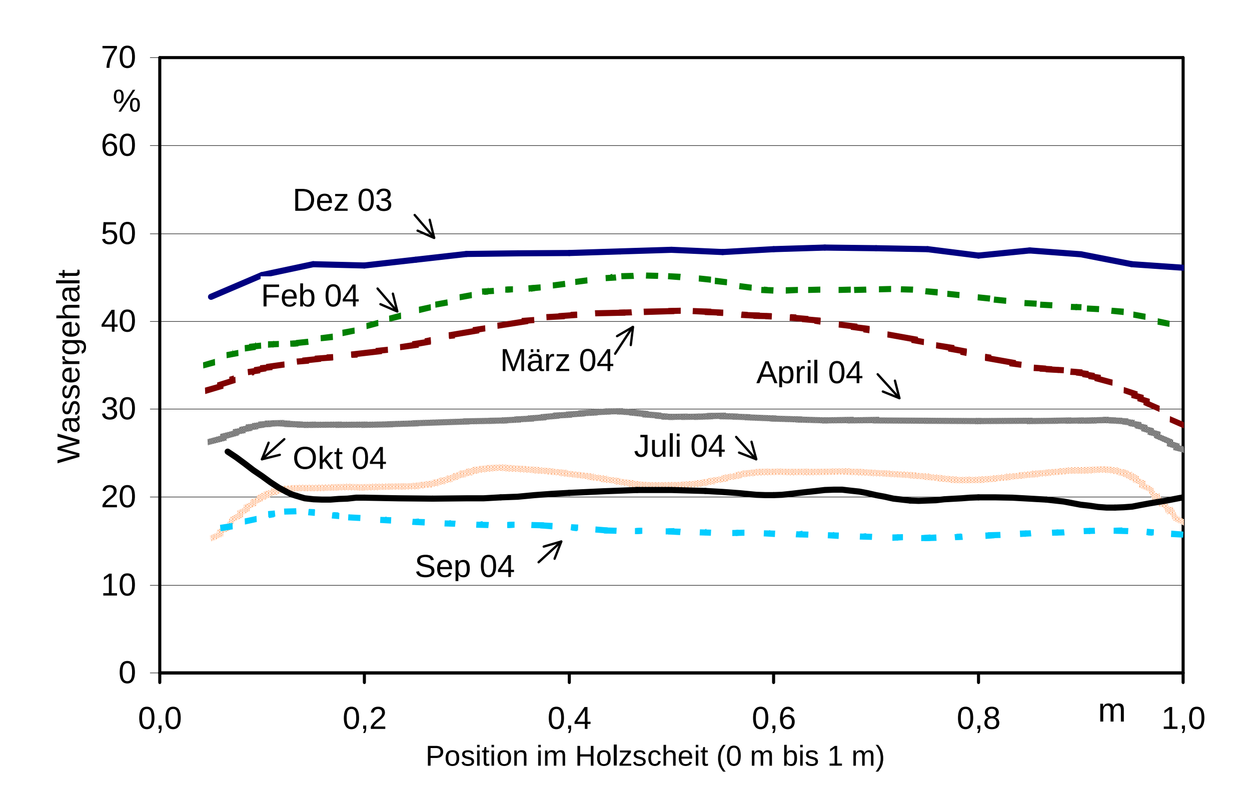


Abbildung 103: Wassergehaltsverteilungen im Meterscheitholz im Jahresverlauf bei unabgedeckter Lagerung im Freien

Die in Abbildung 103 dargestellte inhomogene Wassergehaltsverteilung in einem trocknenden Scheit ist zum größten Teil auf die Tatsache zurückzuführen, dass die bevorzugte Feuchtigkeitsbewegung im Holz der Längsrichtung der Holzzellen folgt (vgl. hierzu Abbildung 99), wodurch ein großer Teil des Wasserverlustes über die Stirnseiten stattfindet. Allerdings kann auch die Inhomogenität des Holzes selbst (z. B. Dichteunterschiede) für eine uneinheitliche Feuchteverteilung verantwortlich sein. Abbildung 104 zeigt, wie beispielsweise Asteinschlüsse bei 20, 60 und 90 cm durch ihren niedrigeren Wassergehalt auffallen.

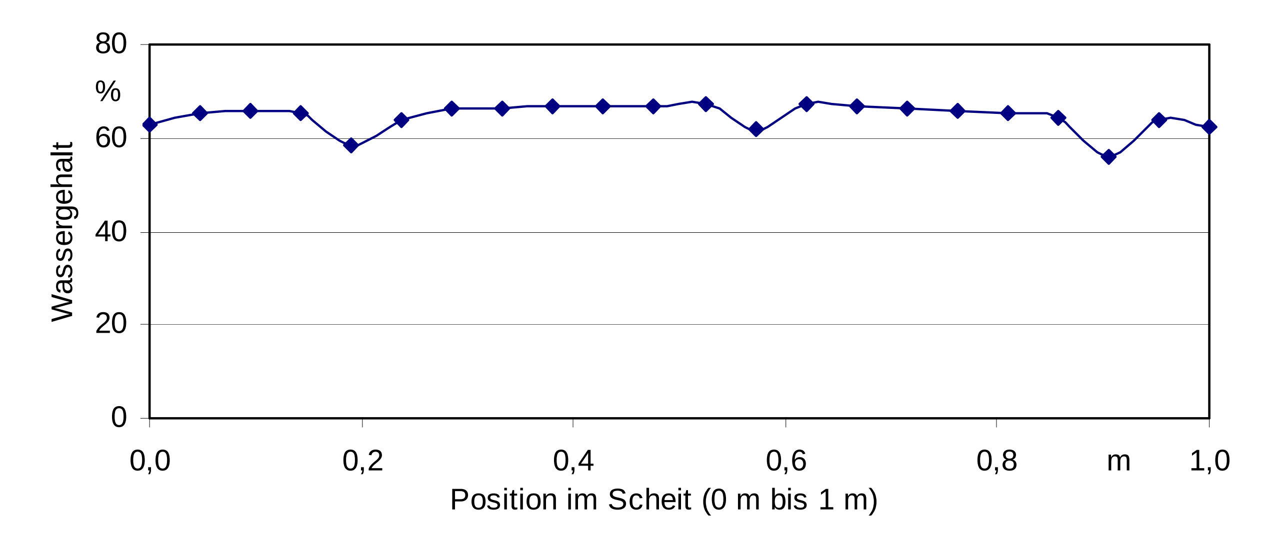


Abbildung 104: Wassergehaltsverteilung in einem waldfrischen Kiefernrundling mit Asteinschlüssen bei 20, 60 und 90 cm

Neben der hier in Längsrichtung gemessenen Wassergehaltsverteilung ist auch im Querverlauf des Holzes (radial) mit veränderlichen Wassergehalten zu rechnen. Das außen liegende Splintholz, beispielsweise, ist im frischen Zustand zunächst feuchter als das Kernholz [42]. Bei Abtrocknung kehrt sich dieser Verlauf um, das zeigt das Beispiel eines frei stehendend trocknenden Kantholzes in Abbildung 105. Zu beachten ist dabei jedoch, dass hier anstelle des Wassergehaltes (w) die Holzfeuchte (u) angegeben ist. Ein Wassergehalt von 20 % (bezogen auf die Gesamtmasse) entspricht einer Holzfeuchte von 25 % (bezogen auf die Trockenmasse).

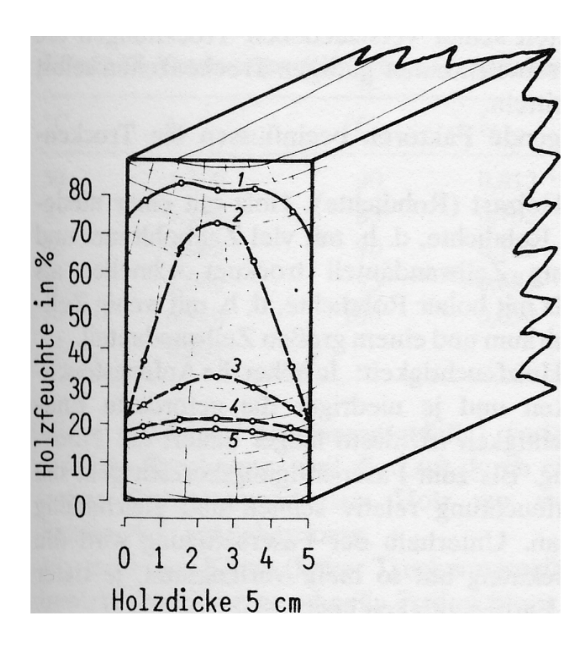


Abbildung 105: Veränderung der Holzfeuchteverteilung in einer 50 mm dicken frei stehenden Buchenbohle [28]. Erläuterung: 1 nach 6 Wochen, 2 nach 6 Monaten, 3 keine Angabe, 4 nach 12 Monaten, 5 nach 18 Monaten

5.5.6 Trockenmasseverluste bei der Lagerung

Durch den Vergleich der Gesamttrockenmassen zu Lagerbeginn und zum Lagerende sind Aussagen über die Trockenmasseverluste über die gesamte Lagerdauer möglich (zu Methodik vgl. Kapitel 4.5). Dabei ist festzustellen, dass die Trockenmasseverluste der Meterstücke bei Innenlagerung über 24 Monate überwiegend geringer waren als bei Außenlagerung. Das zeigt Abbildung 106. Bei den Aufbereitungsformen (gespalten/ungespalten) und den Holzarten (Buche/Fichte) lassen sich dagegen keine einheitlichen Trends erkennen. Das gilt auch für die außengelagerten Varianten "abgedeckt" und "nicht abgedeckt", die hier wegen der großen Streuung der Einzelwerte zusammengefasst werden mussten. Auch zum Verlauf des Trockenmasseverlustes lassen sich aus den durchgeführten Versuchen keine Aussagen ableiten, da der Trocknungsversuch (Kapitel 5.5) zwischen der Anfangs- und Endfeststellung des Wassergehaltes möglichst ungestört von weiteren Probennahmen ablaufen sollte.

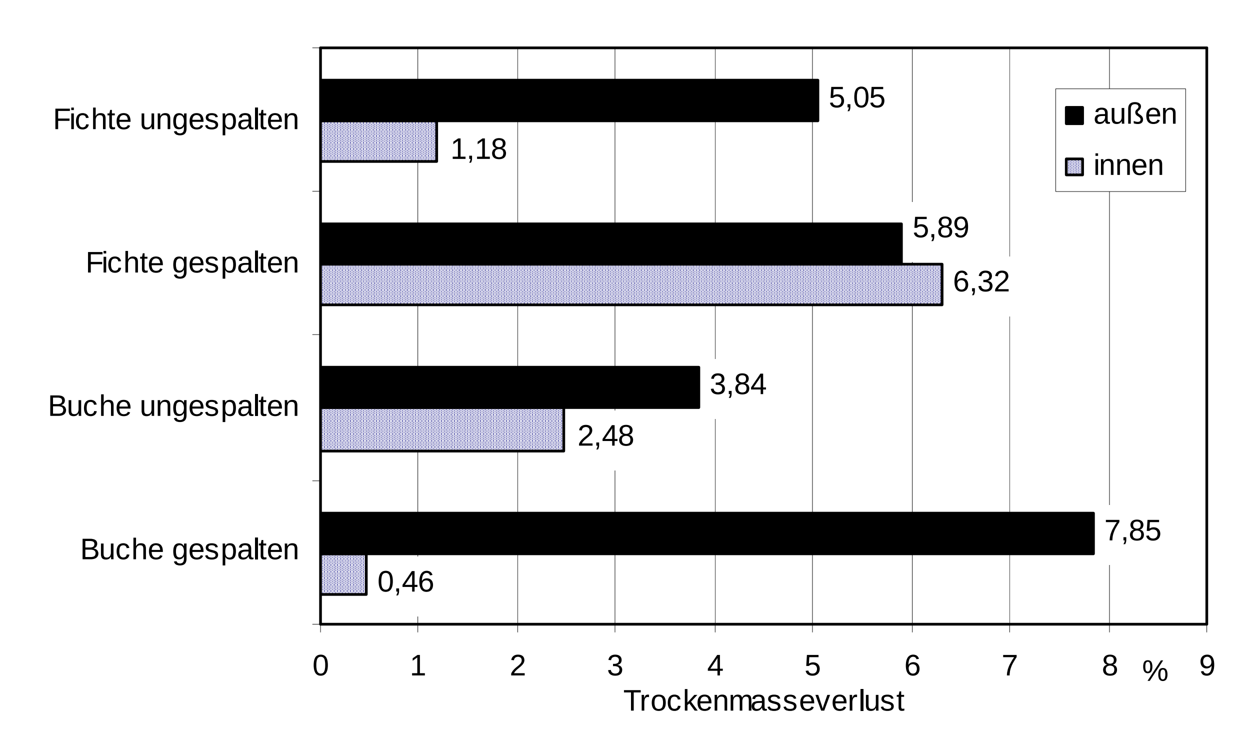


Abbildung 106: Trockenmasseverlust unterschiedlicher Meterholzsortimente bei Lagerung innen und außen. Lagerstandort: Freising, Lagerdauer: 24 Monate, Werte für "außen" sind Mittelwerte für abgedeckte und unabgedeckte Lagerung

Generell sind die absoluten Zahlenwerte für die Trockenmasseverluste mit einer relativ großen Unsicherheit behaftet. Das zeigt die große Streuung der Werte, vor allem für die außen gelagerten Bündel. Offenbar ist eine repräsentative Probennahme gerade bei langen Scheiten schwierig, so dass trotz des hohen Messaufwandes (Endwassergehaltbestimmung an je vier Scheiten pro Bündel à drei Messstellen, d. h. über 600 Proben) nur eine ungefähre Größenordnung für die Verluste feststellbar ist. Die hohe Messwertstreuung geht vor allem auf die messtechnische Unsicherheit bei der Bestimmung des Anfangswassergehaltes zurück, dieser ist im Gegensatz zum Endwassergehalt deutlich weniger einheitlich, das gilt sowohl für die Messwerte zwischen den Scheiten als auch für die Feuchteverteilung innerhalb der Scheite. Diese probenahmetechnische Schwierigkeit lässt sich am besten verdeutlichen, indem die Bandbreite der Wassergehalte im Frischzustand betrachtet werden, diese lag bei Fichtenholz zwischen 40,3 und 60,7 % (bei 14 je dreifach beprobten Meterhölzern). Bei Buchenholz betrug die Bandbreite von 39,4 bis 49,2 % (bei 15 je dreifach beprobten Meterhölzern). Auch die Standardabweichung der Wassergehalte zwischen den Scheiten lag mit 5,2 (Fichte) bzw. 2,7 (Buche) relativ hoch.

Da keine systematischen Unterschiede der einzelnen Sortimente erkennbar sind, erscheint es auch angesichts der o. g. Unsicherheiten geboten, die Trockenmasseverluste als Mittelwerte anzugeben. Für eine überschlägige Abschätzung der Trockenmasseverluste bei 2-jähriger Lagerung ist somit bei gut belüfteter Innenlagerung von einem Wert von ca. 2,6 % auszugehen. Bei Außenlagerung erhöht sich der Trockenmasseverlust auf ca. 5,7 %. Mit diesen Werten wurden auch die gemessenen Gewichte der einzelnen Holzbündel zur Bestimmung der einzelnen Wassergehalte und somit der Wassergehaltsverlauf über die Lagerungsdauer korrigiert (Kapitel 5.5.5).

Nicht in die Auswertungen einbezogen wurden die Werte für die Bündel der Versuchserweiterungen mit Fichte und Buche im November 2003. Bei dieser nur einjährig durchgeführter Lagerung war die Repräsentativität der Probennahme für die Wassergehaltsbestimmung offenbar nicht gegeben, denn in der Auswertung hatten sich rechnerisch sogar leichte Trockenmassezuwächse ergeben. Da sich diese unplausiblen Werte vor allem durch die hier geringere Probenanzahl erklären lassen, wurden die Auswertungen zur Trockenmasseverlustbestimmung verworfen. Ähnlich unplausibel waren auch die Ergebnisse für das Kiefernholz, die ebenfalls verworfen wurden; hier hatten sich ebenfalls rechnerisch leichte Trockenmassezuwächse ergeben. Dennoch lässt sich auch aus diesen Fehlversuchen ableiten, dass die für Fichte und Buche genannten Verlustwerte eher als Obergrenze der tatsächlichen Verluste zu interpretieren sind, sofern – wie im vorliegenden Fall – eine gute Durchlüftung der Holzstapel innen wie außen stets sichergestellt ist.

Diese Vorsicht bei der Interpretation der Ergebnisse erscheint umso mehr geboten, als es sich bei der Kiefer tendenziell eine die Holzart handelt, bei der aufgrund ihrer relativ höheren Dauerhaftigkeit mit den geringsten Trockenmasseverlusten zu rechnen gewesen wäre, so dass die rechnerische Trockenmassezunahme zumindest einen plausiblen Trend für den Vergleich der Holzarten aufzeigt. Die Dauerhaftigkeit des Holzes stellt eine nach DIN EN 350-2 [15] messbare Kenngröße für Holz dar, sie ist definiert als die Zeitspanne, während der verarbeitetes oder unverarbeitetes Holz ohne die Anwendung von Konservierungsmaßnahmen seinen Gebrauchswert behält (= natürliche Dauerhaftigkeit). Sie wird u. a. bestimmt durch Raumdichte, Harzgehalt und Inhaltsstoffe und kann, je nach dem einwirkenden Agens, differenziert werden in Dauerhaftigkeit gegenüber Chemikalien, Feuer, atmosphärischen Einflüssen, Pilzen, Bakterien, Termiten etc.. Die Dauerhaftigkeit gegenüber Pilzen wird durch Abbauversuche an genormten Holzproben ermittelt. Unter praxisnahen Bedingungen im Wald (Lagerung von Rund- oder Schnittholz) bezeichnet man sie als "Lagerverhalten" [56]. Gemäß dem in Tabelle 30 vorgestellten Klassifizierungsschema wäre bei Kiefernholz ein geringerer Trockenmasseverlust zu erwarten, als bei Buchen- und Fichtenholz.

Tabelle 30: Natürliche Dauerhaftigkeit nach DIN EN 350-2 [54]und[15]

Resistenzklasse		Mittlere Standdauer und Holzarten
1	sehr dauerhaft	13 Jahre Standdauer nur überseeische Holzarten (z. B. Teak)
1 bis 2	dauerhaft – sehr dauerhaft	11 bis 13 Jahre Standdauer z. B. Robinie
2	dauerhaft	8 bis 11 Jahre Standdauer z. B. Eiche, Mahagoni
3	mäßig dauerhaft	5 bis 8 Jahre Standdauer z. B. Douglasie, Nussbaum
3 bis 4	wenig bis mäßig dauerhaft	4 bis 6 Jahre Standdauer z. B. Lärche, Kiefer
4	wenig dauerhaft	2 bis 5 Jahre Standdauer z. B. Fichte, Tanne
5	nicht dauerhaft	<3 Jahre Standdauer z. B. Buche, Birke, Ahorn, Esche

5.5.7 Dichteunterschiede innerhalb der gelagerten Holzarten

Schon zu Lagerungsbeginn waren größere Gewichtsunterschiede zwischen den Standardbündeln der Standorte Freising und Kempten aufgefallen. Es wurde vermutet, dass die Rohdichte der Baumarten von der Norm, also dem Gesamtdurchschnitt, abweicht. Bei Lagerende konnte diese These durch das letzte Wiegen und das genaue Ermitteln des Wassergehaltes nachgeprüft werden. Dabei zeigte sich, dass die Stapeldichte der in Freising eingelagerten gespaltenen Fichtenholzcharge ähnlicher Scheitdurchmesser (visuelle Überprüfung) mit durchschnittlich 323 kg/Rm deutlich über dem Wert für Kempten mit 257 kg/Rm oder dem Wert für die spätere Lagerversuchserweiterung in Freising mit 251 kg/Rm lag. Damit ergibt sich ein Unterschied der drei genannten Chargen von über 20 %. Die einzelnen Raumdichten dieser auf einen Einheitswassergehalt von 15 % berechneten Holzmasse sind in Abbildung 107 zusammengestellt.

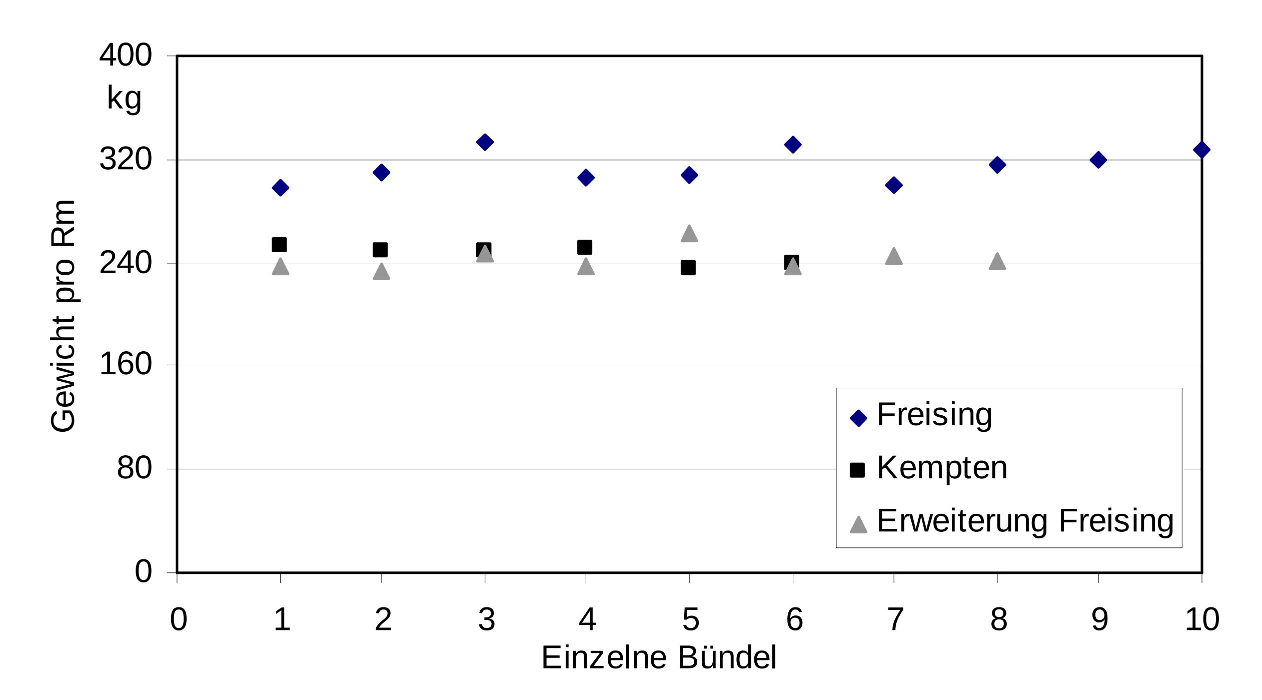


Abbildung 107: Gewichtsstreuung pro 1 Rm Bündel mit gespaltenem Fichtenholz (berechnet auf einen einheitlichen Bezugswassergehalt von w = 15 %)

Diese auf den ersten Blick relativ großen Unterschiede lassen sich durch die natürlichen Rohdichteschwankungen des Holzes erklären, wobei die Rohdichte die Dichte der reinen Holzmasse ist. Sie variiert zwischen zwei verschiedenen Ernteorten und je nach Dominanz des Baumes (ober- oder unterständiger Baum) auch innerhalb eines Baumes (Wipfelholz, Astholz oder Stammholz, Holz des Stammfußes, Anteil an Druckholz, etc.). Diese Variabilität ist in Abbildung 108 für ausgewählte Baumarten dargestellt.

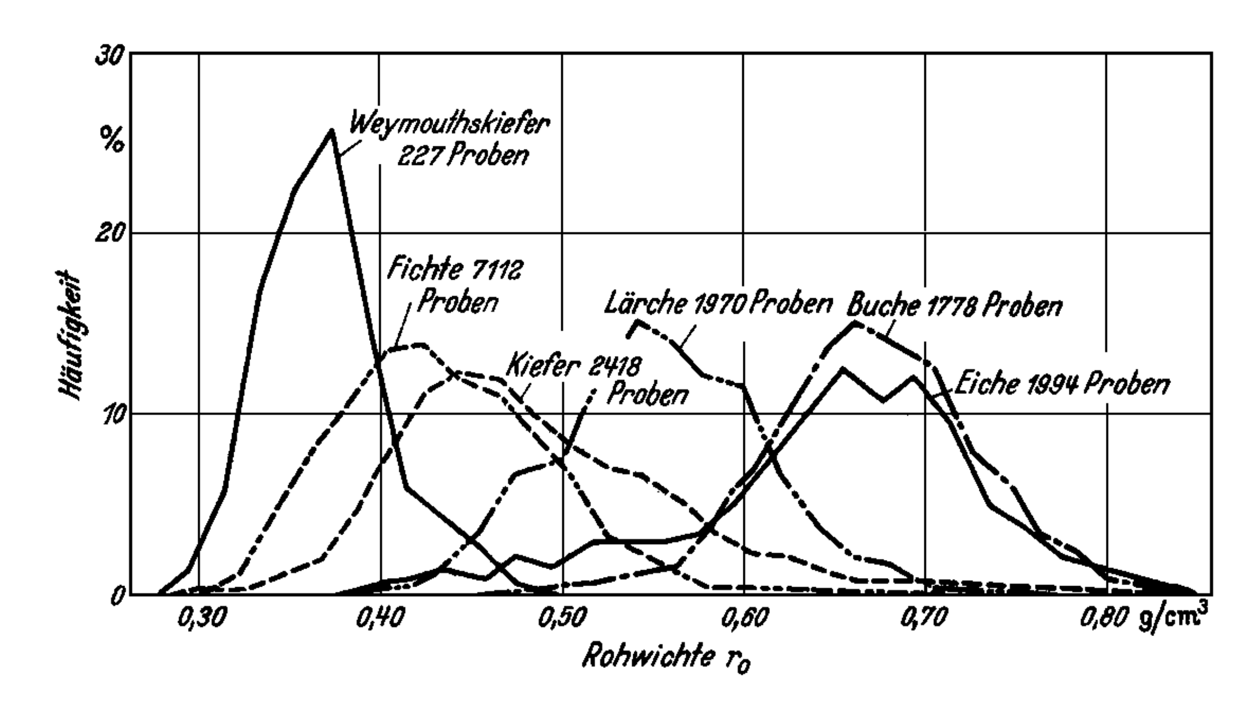


Abbildung 108: Häufigkeitsverteilung der Rohdichte (veraltet "Rohwichte") bei ausgewählten Baumarten [35]

Die im Versuch gemessenen Gewichte der einheitlich großen Fichten-Halbraummeterbündel (0,5 m³) wurde vereinfachend in eine Raummeterangabe (Gewichtsverdoppelung) und auf einen Referenzwassergehalt von w=15 % umgerechnet. Diese so errechneten Raummetergewichte lagen im verkaufsfertigen Zustand zwischen 230 kg bis 330 kg. Legt man die Rohdichtespannen für Fichte aus Abbildung 108 zugrunde (0,30 g/cm³ bzw. 0,64 g/cm³), so errechnet sich für lufttrockenes Fichtenholz eine maximale Spannbreite von sogar 193 bis 412 kg/Rm (lufttrocken w=15 %). Aus Sicht des Produzenten ist aber ein volumenbezogener Scheitholzverkauf dennoch relativ risikolos, weil sich über die Masse des insgesamt abgesetzten Holzes ein für die Preisfeststellung zutreffendes mittleres Raumgewicht von ca. 260 kg/Rm ergibt (bei 15 % Referenzwassergehalt). Ein möglicher Brennholzkunde kann hingegen theoretisch im Extremfall ein Fichtenraummeter-Bündel gleichen Wassergehalts mit 193 kg oder mit 412 kg für den gleichen Geldbetrag erwerben, was bezogen auf den Brennstoffwert einem über 100-%igen Unterschied gleichkommt. Derartige Spannbreiten sind allerdings in der Praxis äußerst selten.

Dennoch könnte eine massebezogene Holzpreisfeststellung (Verkauf nach Gewicht) hier Abhilfe schaffen, sofern der Wassergehalt innerhalb akzeptabler Bandbreiten schwankt. Generell sind die möglichen Gewichtsunterschiede zwischen waldfrischen und lufttrockenen Holzbündeln auch im Extremfall etwas niedriger als die maximale Spannweite bei den Dichteunterschieden: Ein Fichten-Raummeterbündel, das im lufttrockenen Zustand (w=15 %) 264 kg wiegt, kann im waldfrischen Zustand (w=50 %) maximal 459 kg schwer sein.

Neben dem Wassergehalt und der Holzdichte hängt das Gewicht eines Raummeterbündels auch von der Aufbereitungsform ab. Mit ungespaltenen Meterholz-Rundlingen lässt sich in der Regel eine dichtere Packung erreichen, als mit gespaltenem Holz, das zeigt Abbildung 109. Für den Brennholzhandel mit volumenbezogener Abrechnung ergibt sich daraus eine zusätzliche Unsi-

cherheit bei der Wertfeststellung, zumal in Abbildung 109 auch die deutlich erhöhten Gewichte bei der Fichte ersichtlich sind, was auf einen höheren Rohdichtewert als 0,43 g/cm³ für die Fichte hinweist. Die Bestimmung von Umrechnungsfaktoren für die einzelnen Aufbereitungs- und Stapelformen stellt einen eigenen Arbeitsschwerpunkt im vorliegenden Projekt dar, hierüber wird in Kapitel 4.4 berichtet.

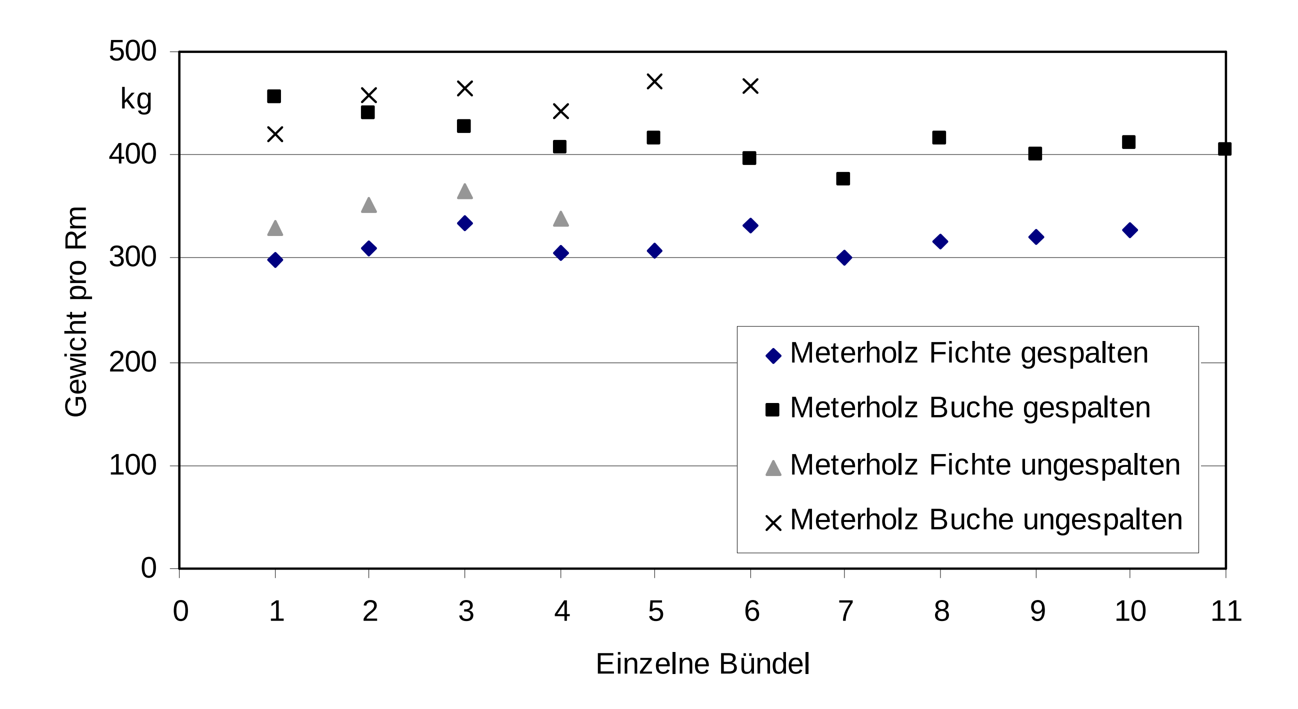


Abbildung 109: Gewichte von Rundlingen und gespaltenem Holz in einem Raummeterbündel bei Fichte und Buche (berechnet auf einen einheitlichen Bezugswassergehalt von w=15 %

5.6 Umrechnungsfaktoren für Brennholzsortimente

5.6.1 Ergebnisse der Stapelversuche

Die in Kapitel 4.4 dargestellten Messungen wurden hinsichtlich der Umrechnungsfaktoren zwischen den verschiedenen Buchen- und Fichtenholzsortimenten ausgewertet; die Ergebnisse werden in Abbildung 110 und Abbildung 111 dargestellt. Darin wurde eine Darstellungsweise gewählt, bei der ein Raummeter mit geschichteten 33-cm-Scheiten bzw. gespaltenen Meterscheiten als 1,0 gesetzt ist, so dass alle übrigen Maße sich auf dieses Maß beziehen.

Bei den Auswertungen wurden die Bestimmungen vom Frühjahr und vom Herbst 2004 zusammengefasst, zumal sich bei den Sortimenten aber auch bei den für Rundlinge noch zusätzlich durchgeführten Mittendurchmesserbestimmungen gezeigt hatte, dass durch die 6-monatige Lagerung und Trocknung noch keine messbare Schrumpfung eingetreten und auch die Wassergehalte kaum nennenswert unter den hierfür kritischen Fasersättigungspunkt gefallen waren (vgl. Kapitel 5.5.2). Für die Feststellung der Umrechnungsfaktoren wäre eine mögliche Schrumpfung ohnehin belanglos gewesen, da diese Faktoren als Quotient zweier Aufbereitungsformen aus ein und derselben Ursprungsmenge einer Charge errechnet worden waren. Da sich eine mögliche Schrumpfung auf alle Aufbereitungsformen proportional ausgewirkt hätte, wäre dieser Effekt ohne Wirkung auf das Ergebnis geblieben. Somit konnten sämtliche Messungen vom Herbst als Wiederholungen der Frühjahrsmessungen ausgewertet werden.

Für die Messungen des Schüttgut-Sortiments (33-er Scheite) ließ sich ebenfalls kein klarer Trend zu eventuellen Unterschieden zwischen der Gitterbox und dem Messrahmen ableiten. Daher wurden diese Werte ebenfalls zusammengefasst und als Gesamtmittelwert für die geschütteten 33-er Scheite ausgegeben. Die vollständigen Messwerte werden im Anhang 11.4 nach Messzeitpunkt und Behälterart differenziert zusammengestellt.

Die Ergebnisse in Abbildung 110 zeigen, dass ein Raummeter Brennholz in Form von geschichteten 33-cm-Scheiten aus durchschnittlich 0,62 Fm Buchenholz bzw. 0,64 Fm Fichtenholz hervorgeht. Während hier somit kaum Unterschiede festzustellen sind, muss bei den übrigen Sortimenten stärker zwischen den beiden gemessenen Baumarten differenziert werden. Am Beispiel der Umrechnung für gespaltenes geschichtetes Meterholz wird dieser Holzarteneinfluss ersichtlich. Für einen Raummeter geschichtete 33-cm-Scheite werden 1,16 Rm Fichten-Meterscheite aber 1,23 Rm Buchenmeterscheite benötigt. Umgekehrt bedeutet dies, dass ein Brennholzkunde, der beim Brennholzhändler einen Raummeter ofenfertiges Buchenholz bestellt und hierbei die im Handel häufig geltende Bemessungsgrundlage des gespaltenen aber noch nicht ofenfertig geschnittenen Meterscheitholzmaßes vereinbart, bei der Auslieferung im geschnittenen Zustand als 33-er Scheite nur noch 0,81 Rm erhält, während es beim Fichtenholz noch 0,86 Rm sind. Diese Zahlen errechnen sich aus dem Kehrwert der in Abbildung 110 dargestellten Umrechnungsfaktoren, sie können aber auch aus Abbildung 111 oder aus der vollständigen Zusammenstellung aller Umrechnungsfaktoren für unterschiedliche Bezugsgrößen in Tabelle 31 abgelesen werden.

Genau umgekehrt sind die Verhältnisse bei lose geschütteten Scheiten, wenn diese – wie in Kapitel 4.4.3 dargestellt – über ein Förderband aus 2,50 m Höhe in einen Behälter fallen. Hier ist der spezifische Raumbedarf der Fichtenscheite mit dem 1,62-fachen höher als bei Buchenscheiten, die nur das 1,48-fache des geschichteten Raummaßes benötigen (Abbildung 110).

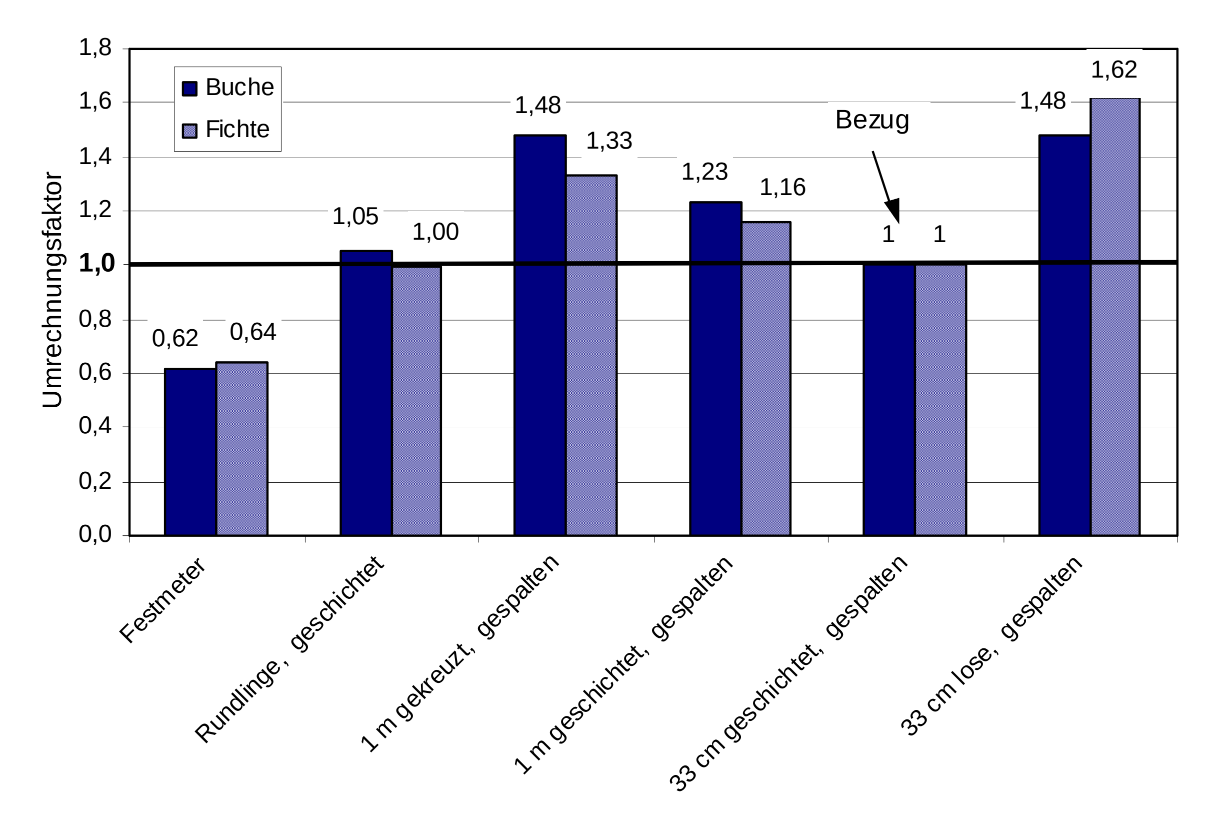


Abbildung 110: Umrechnungsfaktoren zwischen verschiedenen Sortimenten und Lagerformen, hier: bezogen auf 1 Raummeter 33-cm-Scheite, geschichtet

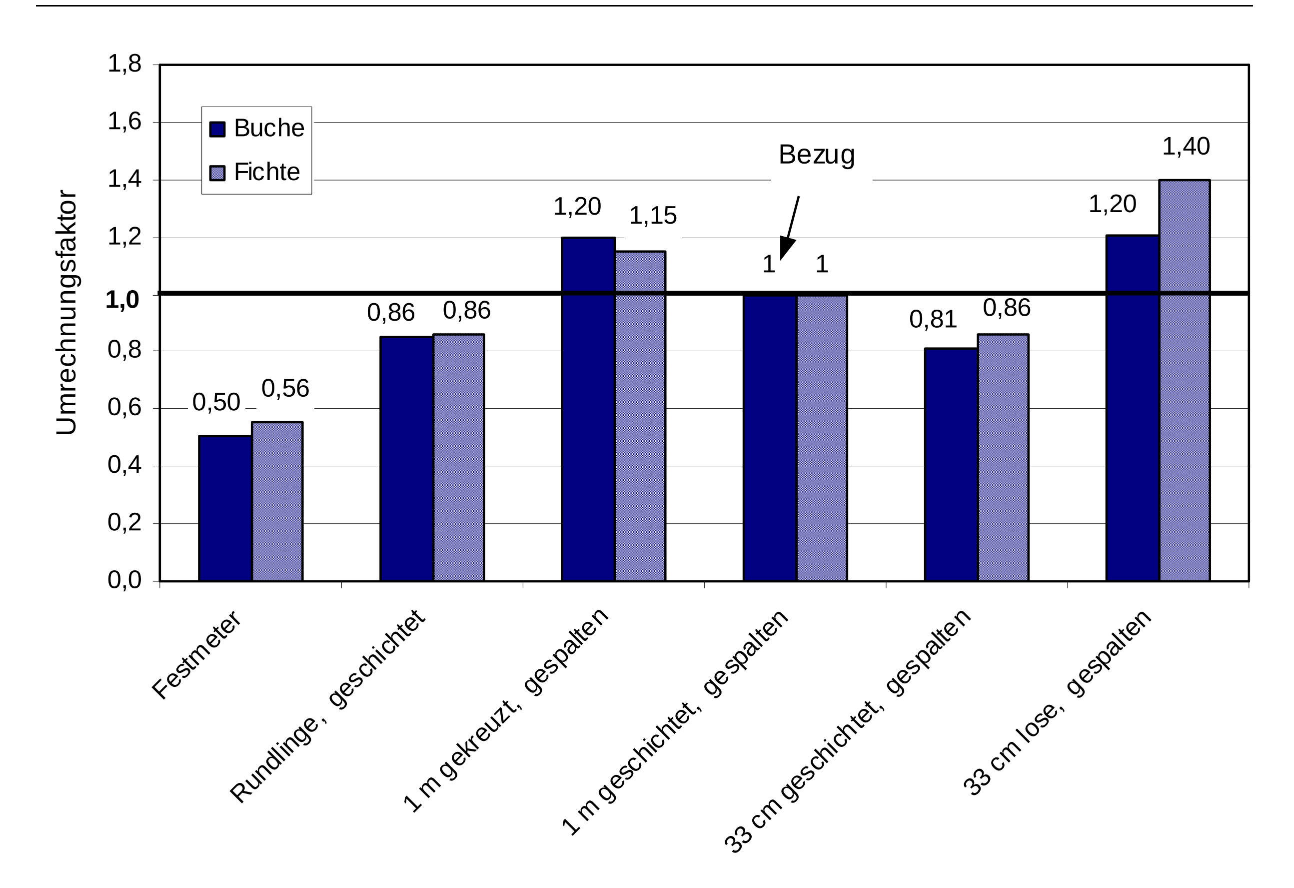


Abbildung 111: Umrechnungsfaktoren zwischen verschiedenen Sortimenten und Lagerformen, hier: bezogen auf 1 Raummeter (Rm) gespaltene Meterholzscheite, geschichtet

Insgesamt zeigen die dargestellten Ergebnisse (Abbildung 110, Abbildung 111), dass die Umrechnungsfaktoren nicht ohne weiteres für verschiedene Holzarten einheitlich verwendet werden können. Als Gründe für die hier festgestellten Unterschiede ist ein Zusammenspiel mehrerer Holzeigenschaften zu vermuten.

Zum einen sind die Rohdichten der Hölzer sehr verschieden (Buche 0,68 und Fichte 0,43 g/cm³, vgl. [39]) dies könnte sich z. B. beim Schüttgut-Raummaß ausgewirkt haben, da die Scheite beim Herabfallen aus 2,5 m Höhe (vgl. Kapitel 4.4.4) eine größere Wucht und damit größere Erschütterung auf die darunter liegende Holzschicht ausüben, was zur platzsparenderen Neuausrichtung der darunter liegenden Schichten geführt haben kann. Zudem ist die Holzoberfläche der beiden Holzarten verschieden, was mit der Rauhigkeit der Rinde und ggf. mit dem Harzanteil zusammenhängt. Auch hier könnte die höhere Rauhigkeit der Fichte zu einer stärkeren Vernetzung der Scheite im Schüttgut geführt haben, während sich die glatteren Oberflächen der Buchenscheite möglicherweise platzsparender gegeneinander verschieben ließen.

Beim manuellen Schichten werden die Scheite dagegen in vorgegebener Orientierung abgelegt, so dass derartige Unterschiede durch den Benutzer ausgeschaltet werden. Dies zeigt sich auch an den Ergebnissen, die für die Fichte sogar eine effizientere Raumausnutzung aufzeigen als für die Buche. Auch hierfür lassen sich möglicherweise typische Holzmerkmale als Begründung heranziehen. Beispielsweise ist von einem unterschiedlichen Wuchs auszugehen (z. B. Astigkeit, gekrümmtes Wachstum, unterschiedliche Querschnittsformen). Dies könnte bei der Fichte dazu ge-

führt haben, dass es aufgrund ihrer gleichmäßigeren Holzgeometrie und evtl. auch wegen einer stärker parallelen Spaltführung beim Zerkleinern zu einer platzsparenderen Ablage im Stapel bzw. weniger Hohllagerung kommt.

Die Differenz der Schüttraummaße verschiedener Holzarten war im Versuch schon mit bloßem Auge deutlich erkennbar. Abbildung 112 zeigt als Beispiel geschüttete 33-er Scheite in Gitterboxen. Der Inhalt beider Boxen war aus je einem Raummeterbündel durch jeweils gleiches Spalten und Sägen hervorgegangen, jedoch zeigt sich für die Fichtenscheite eine deutlich größere Füllhöhe als für die Buchenscheite, wobei die beiden verwendeten Lagerbehälter gleiche Abmessungen hatten.



Abbildung 112: Unterschiedliche Füllhöhe von 33-er Scheiten verschiedener Holzarten aber gleicher Ausgangsmengen (Rohholzvolumen). links: Buche; rechts: Fichte

Ebenfalls deutliche Unterschiede ergeben sich auch zwischen den Sortimenten, unabhängig von der gemessenen Holzart. Vor allem zwischen den gestapelten 33-cm-Scheiten und den ebenfalls gestapelten Meterscheiten besteht eine relativ große Differenz, obwohl hier lediglich die Scheitlänge variiert und der (minimale) Masseverlust durch den zweifachen Sägeschnitt hier vernachlässigt wurde (Kapitel 4.5.4.2). Für das Aufsetzen von einem Raummeter 33-er Scheite werden bei Buchenholz 1,23 Rm gespaltene Meterscheite benötigt; das ist etwas mehr als bei der Fichte (1,16 Rm). Diese Zahlen verdeutlichen, dass sich kürzere Scheite platzsparender, das heißt mit weniger Zwischenraum, schichten lassen. Dies liegt daran, dass kurze Scheite gleichförmiger sind und dass Unebenheiten und Biegungen im Holz bei kurzen Scheiten mit kurzer Auflage weniger große Hohlräumen bilden als längere Scheite. Aus einem sichelförmig gebogenen Meterscheit entstünden beispielsweise durch das zweifache Sägen drei kurze Scheite mit einer sehr viel gerin-

geren Hohllage. Bei der Fichte ist die Differenz zwischen Meterscheiten und 33-er Scheiten weniger stark ausgeprägt, da die Fichtenmeterscheite generell schon gleichförmiger sind. Eine vollständige Zusammenstellung aller Umrechnungsfaktoren für unterschiedliche Bezugsgrößen ist in Tabelle 31 dargestellt.

Für die Praxis ergibt sich hieraus die Forderung, dass der Brennstoffhandel gegenüber den Kunden die Bezugsbasis für seine Preisfestlegung eindeutig mitteilen sollte, damit Missverständnisse und Verwirrungen über die Bemessung der Lieferung bei einer späteren Volumenbestimmung durch den Kunden vermieden werden können. Generell ist außerdem festzuhalten, dass eine korrekte Umrechnung in andere Sortimente und Lagerarten für Brennholz ohne eine Unterscheidung nach Holzart ungenau bleibt. Inwieweit die Gruppe der Laubhölzer und die Gruppe der Nadelhölzer durch die hier gewählten Baumartenvertreter Buche bzw. Fichte ausreichend repräsentiert werden, kann allerdings derzeit nicht beurteilt werden.

Bei der Verwendung der hier vorgestellten Umrechnungsfaktoren ist außerdem zu beachten, dass es sich um Holzchargen mit gleichem Wassergehalts handeln sollte. Wenn zwischen Meterholzaufbereitung und dem Zuschneiden auf 33 cm Scheitlänge eine mehrmonatige Trocknungsperiode liegt, erhöht sich die Lagerdichte infolge von Schrumpfungsprozessen. Folglich ist das Volumen der gestapelten oder geschütteten trockenen Kurzscheite nochmals leicht geringer.

Tabelle 31: Umrechnungsfaktoren für Raum- und Festmetermaße, bezogen auf unterschiedliche Grundsortimente (mit Rinde)

Holzart	Festmeter (Fm)	Rundlinge geschichtet (Rm)	gespalten 1 m, gekreuzt (Rm)	gespalten 1 m, geschichtet (Rm)	Scheite 33 cm, geschichtet (Rm)	Scheite 33 cm, lose geschüttet (SRm)
bezogen auf einen Festmeter (mit Rinde):						
Buche	1,00	1,70	2,38	1,98	1,61	2,38
Fichte	1,00	1,55	2,07	1,80	1,55	2,52
bezogen auf einen Raummeter Rundlinge:						
Buche	0,59	1,00	1,40	1,17	0,95	1,40
Fichte	0,65	1,00	1,34	1,16	1,00	1,63
bezogen auf einen Raummeter gespaltener Meterscheite:						
Buche	0,50	0,86	1,20	1,00	0,81	1,20
Fichte	0,56	0,86	1,15	1,00	0,86	1,40
bezogen auf einen Raummeter gestapelter 33-er Scheite (gespalten):						
Buche	0,62	1,05	1,48	1,23	1,00	1,48
Fichte	0,64	1,00	1,33	1,16	1,00	1,62
bezogen auf einen Schüttraummeter 33-er Scheite (gespalten):						
Buche	0,42	0,71	1,00	0,83	0,68	1,00
Fichte	0,40	0,62	0,82	0,72	0,62	1,00

Zur Beurteilung der hier verwendeten Messmethode ist es sinnvoll, die Wiederholbarkeit der Einzelbestimmungen zu beurteilen. Tabelle 32 zeigt dazu die Variationskoeffizienten der drei Einzelmessungen des Ausgangsmaterials im Messrahmen (vgl. 4.4) mit Minimal- und Maximalwerten. Es zeigt sich, dass die Variationskoeffizienten der Mittelwerte mit 0,34 % (Fichte, 33 cm gespalten, geschichtet) bis 5,88 % (Buche, 33 cm lose, gespalten, Gitterbox) relativ niedrig sind, so dass für das Messverfahren eine hohe Zuverlässigkeit festzustellen ist. Bei der Fichte war auf Grund der größeren Gleichförmigkeit des Ausgangsmaterials die Messgenauigkeit etwas höher, in einem Fall kam es sogar zu exakt den gleichen Messwerten bei den drei Einzelmessungen (vgl. VK=0%, bei "Min" für Fichte 33 cm geschichtet, gespalten). Erwartungsgemäß ist die Wiederholbarkeit bei den geschütteten Sortimenten etwas geringer.

Tabelle 32: Relative Variationskoeffizienten (VK in %) der Wiederholungsmessungen im Messrahmen bzw. in der Gitterbox

Sortimente	Buche			Fichte		
	VK (%) Mittelwert	VK (%) min	VK (%) max	VK (%) Mittelwert	VK (%) min	VK (%) max
Rundlinge, geschichtet	2,67	1,28	4,76	1,08	0,58	1,36
1 m geschichtet, gespalten	1,06	0,54	1,78	1,42	0,28	2,52
33 cm geschichtet (gespalten)	1,01	0,73	1,28	0,34	0,00	0,68
33 cm lose, Gitterbox	5,88	4,25	7,51	2,74	1,91	3,57
33 cm lose, Messrahmen	1,24	1,00	1,48	2,61	1,24	3,99

Die Umrechnungsfaktoren wurden aus den dimensionslosen Verhältniszahlen der einzelnen Sortimente (Volumina) zueinander gebildet (vgl. Kapitel 4.4). Tabelle 33 zeigt die Mittelwerte der Variationskoeffizienten, errechnet aus den einzelnen Verhältniszahlen der Sortimente zum Ausgangsmaterial. Im Vergleich zu Tabelle 32 werden in Tabelle 33 somit die Unterschiede zwischen den Chargen einer Holzart betrachtet und nicht – wie in Tabelle 32 – die Wiederholbarkeit der Volumenbestimmung beim Stapeln oder Schütten selbst. Auch bei diesen Berechnungen liegt der Variationskoeffizient (VK) für die Fichtenchargen im Vergleich zur Buche niedriger. Die VK-Werte von 6 bis 7,5 % für Messungen an Fichte und 7,3 bis 8,8 % für Messungen an Buche deuten insgesamt auf einen relativ geringen Chargeneinfluss hin. Allerdings ist hierdurch keine Aussage möglich, in wie weit das verwendete Ausgangsmaterial als repräsentativ für die Gesamtheit aller Brennholz-Rohsortimente gelten kann. Bei den hier durchgeführten Messungen war Holz mit einem mittleren Durchmesser von 12,2 cm (Buche) bzw. 11,7 cm (Fichte) verwendet worden (zum Probenumfang und zur Methodik vgl. Kapitel 4.4).

Tabelle 33: Relative Variationskoeffizienten (VK in %) der Abweichungen zwischen den berechneten Verhältniszahlen (Umrechnungsfaktoren) für die einzelnen Sortimente (Anzahl Chargen je nach Materialmenge zwischen 4 und 6 Chargen, vgl. Kapitel 4.4.4)

Sortimente	Buche VK (%) Mittelwert	Fichte VK (%) Mittelwert
Rundlinge, geschichtet	8,26	6,65
1 m geschichtet, gespalten	8,81	6,03
33 cm geschichtet, gespalten	7,90	6,22
33 cm lose, gespalten, Gitterbox	7,35	6,01
33 cm lose, gespalten, Messrahmen	8,38	7,50

5.6.2 Vergleich mit Literaturangaben

Die bislang verwendeten Umrechnungsfaktoren für Brennholzsortimente und Lagerarten sind im wesentlichen zwei Quellen zuzuordnen. In Deutschland wird für Brennholz häufig als pauschaler Umrechnungsfaktor vom Raummeter (gestapelt) zum Festmeter ein Wert von 0,7 verwendet. Als Quelle ist hierfür beispielsweise BML [10] zu nennen. Der Faktor wird aber auch in anderen Quellen – jedoch ohne direkten "Brennholzbezug" – identisch verwendet und stammt möglicherweise auch aus einer einheitlichen Ursprungsquelle (vgl. hierzu z. B. [6] und [45]). Er erlaubt eine Umrechnung von Massivholz (Fm) in sogenanntes "Schichtholz" und umgekehrt, wobei nicht differenziert wird, ob es sich beim Schichtholz um Rundlinge, gespaltene Meterscheite oder ofenfertige Kurzscheite handelt.

Außerdem ist eine Umrechnungstabelle aus Österreich bekannt [45], in der Umrechnungsfaktoren genannt werden zwischen den Sortimenten "Rundholz" (in Fm, gemeint ist Massivholz), geschichtete "Meterscheite" (wobei offen bleibt, ob hierzu auch Rundlinge zählen) und ofenfertiges "Stückholz" – sowohl in gestapelter als auch in lose geschütteter Form, wobei die Scheitlänge hier ungenannt bleibt. In beiden Umrechnungstabellen bzw. Quellen erfolgt keine Differenzierung nach Holzarten. Nach Rücksprache mit den Autoren ist festzustellen, dass eine Dokumentation über das Zustandekommen dieser Umrechnungszahlen nicht vorliegt.

Eine Gegenüberstellung dieser relevanten Literaturangaben mit den hier vorgestellten Ergebnissen zeigt Tabelle 34. Darin wurden die im Versuch bestimmten Umrechnungen für kreuzweise geschichtete Meterscheite nicht dargestellt, da hierzu keine direkten Vergleichsmöglichkeiten mit anderen Quellen vorliegen. Die Zusammenstellung zeigt, dass eine Übereinstimmung zwischen den TFZ-Ergebnissen und den pauschal für Schichtholz zu verwendenden Umrechnungsfaktoren des BML [10] nur eingeschränkt besteht. Sie ist für Fichtenholz besser als für Buchenholz, jedoch führt die Umrechnung mit den BML-Werten durchweg zu einer Unterschätzung des aus den Massivholz-Festmetern geschätzten Schichtholzvolumens. Das gilt umso mehr, wenn der Faktor nicht nur für Rundlinge sondern auch für gespaltene Meterscheite verwendet wird, zumal eine genaue Spezifikation in der Quelle fehlt.

Tabelle 34: Vergleich der im Versuch ermittelten Umrechnungsfaktoren mit entsprechenden Angaben aus der Literatur (Quellen: BML [10] und LWK[45], Literaturangaben zur kreuzweisen Schichtung liegen nicht vor, daher hier keine Darstellung)

Massivholz (Fm)				(ungespalten)[a] Rundlinge1 m (Rm)			(gespalten)[b] 1 m geschichtet Rm)			ofenfertig (33 cm)[c] geschichtet (Rm)[d]			ofenfertig (33 cm)[c] lose geschüttet (Rm)[d]		
TFZ		BML	LWK	TFZ		BML[c]	TFZ		LWK	TFZ		LWK	TFZ		LWK
Bu	Fi	–	–	Bu	Fi	–	Bu	Fi	–	Bu	Fi	–	Bu	Fi	–
1,0	1,0	1,0	1,0	1,70	1,55	1,43	1,98	1,80	1,40	1,61	1,55	1,20	2,38	2,52	2,00
0,59	0,65	0,7	–	1,0	1,0	1,0	1,17	1,16	–	0,95	1,00	–	1,40	1,63	–
0,50	0,56	–	0,70	0,86	0,86	–	1,0	1,0	1,0	0,81	0,86	0,80	1,20	1,40	1,40
0,62	0,64	–	0,85	1,05	1,00	–	1,23	1,16	1,20	1,0	1,0	1,0	1,48	1,62	1,70
0,42	0,40	–	0,50	0,71	0,62	–	0,83	0,72	0,70	0,68	0,62	0,60	1,0	1,0	1,0

[a] bei BML: Festmeterangabe ohne Rinde, jedoch keine nähere Angabe zum Raummaß-Sortiment (Rundling, gespalten oder Kurzscheit). Aufgrund der gegebenen Wahrscheinlichkeit wurde die Zahlenangabe den ungespaltenen Meterscheiten (Rundlingen) zugeordnet.
[b] bei LWK: keine Angabe ob gespalten oder ungespalten. TFZ: gespalten
[c] bei LWK: keine Angabe der Scheitlänge. TFZ: 33 cm Scheite, gespalten

Auch zwischen TFZ- und LWK-Werten bestehen zum Teil gravierende Unterschiede. Das gilt vor allem für die Umrechnung vom Massivholz in Meterscheitholz, wobei mit den LWK-Werten deutlich geringere Volumenausbeuten durch die Aufbereitung von Massivholz errechnet werden. Diese liegen sogar noch unter den Werten des BML, die hier – ohne nähere Angaben, daher mit Vorbehalt – dem platzsparenderen Rundholzsortiment zugeordnet wurden. Für die TFZ-Werte kann angegeben werden, dass es sich hierbei um typische Brennholz-Rohsortimente (mit Rinde) mit mittleren Durchmessern von 12,2 cm (Buche) bzw. 11,7 cm (Fichte) handelt, bei denen die Festmeterbestimmung durch Kreuzkluppung des Mittendurchmessers festgestellt wurde (zum Probenumfang und zur Methodik vgl. Kapitel 4.4.4). Für die LWK-Werte liegen keine näheren Angaben über das Zustandekommen vor.

Eine wesentlich bessere Übereinstimmung besteht aber zu den übrigen LWK-Werten, wobei einschränkend erwähnt werden muss, dass bei den Meterscheiten eine eindeutige Definition des "Meterscheitholz"-Sortiments nicht vorliegt. Beispielsweise stimmt die Umrechnung von gespaltenen Fichtenmeterscheiten in geschichtete Kurzscheite vollständig mit den TFZ-Messungen überein, jedoch gilt dies nicht für Buchenholz. Auch die Umrechnung von geschichteten Kurzscheiten in lose geschüttete Kurzscheite ist einigermaßen übereinstimmend für Fichtenholz, nicht jedoch für Buchenholz. Zum Teil vorhandene Unterschiede können auch auf die bei LWK offenbar teilweise durchgeführte Rundung auf nur noch eine Dezimalstelle zurückgeführt werden.

Diese Vergleiche legen nahe, dass es sich bei den LWK-Werten um Angaben für Fichtenholz (oder Nadelholz allgemein) handelt. Genauere Angaben liegen nicht vor, auch in der vermuteten ursprünglichen Datenquelle für die LWK-Angaben, der HOMA Holzmessanweisung von 1936 [30], erfolgt hierzu keine Holzartennennung. Was jedoch bei der HOMA und später auch noch bei PRODAN (1951) [48] auffällt, sind die differenzierten Angaben zur Umrechnung einzelner Sortimente. Hier wird beispielsweise zusätzlich noch zwischen Schichtderbholz oder Schichtreiserholz unterschieden. Bei späteren Zahlenangaben in anderen Quellen werden diese zusätzlichen Um-

rechnungsfaktoren jedoch weggelassen. Diese liegen jedoch niedriger, als die Angaben für aufbereitetes Schichtholz. Zum Beispiel wird in der HOMA für Nutzreiserprügel mit Rinde ein Umrechnungsfaktor von 0,50 Rm/Fm genannt.

Der bisher angewendete pauschale Faktor von 0,7 für das Umrechnen von Raummeter Schichtholz in Festmeter ohne Rinde bzw. 0,8 für die Umrechnung von Holz mit Rinde ist schon der Holzmessanweisung (HOMA) aus dem Jahr 1936 zu entnehmen, er findet sich auch in den Rohholzsortierungsbestimmungen für den Gebrauch im bayerischen Staatswald [6] ohne weitere Anmerkung. Bei KRAMER UND AKÇA [36] wird dieser Faktor ebenfalls genannt, jedoch sollte er den Autoren zufolge nur für statistische Zwecke Verwendung finden. Im Kommentar zur HOMA bei KNIGGE UND SCHULZ [34] verweisen die Autoren darauf, dass eine Umrechnung von Schichtholz auf Festmeter mit Hilfe der Umrechnungsfaktoren den tatsächlichen Gehalt an Holzmasse relativ ungenau wiedergibt. Die Autoren machen eine Reihe von Verbesserungsvorschlägen für die Messmethode zur Rohholzvolumenbestimmung, beispielsweise das sektorenweise Kluppen oder keine Zugaben bei Längenmessungen etc. Diese Vorschläge wurden in der vorliegenden Untersuchung bereits berücksichtigt.

Die neu bestimmten Umrechnungsfaktoren haben Auswirkungen auf die Berechnung der im jeweiligen Sortiment enthaltenen Energiemenge. In bisherigen Faustzahlentabellen wurden üblicherweise lediglich der Wassergehalt und die Rohdichte als Einflussgrößen berücksichtigt, während die Umrechnung von Festmeter in Raummeter anhand eines pauschalen Faktors (vgl. Tabelle 34) für alle gestapelten Sortimente einheitlich erfolgte (vgl. u.a. [6],[45]). Zukünftig sind hierzu differenzierte Betrachtungen je nach Aufbereitungs- und Lagerform erforderlich. Derartige differenzierte Neuberechnungen sind in Tabelle 35 zusammengestellt.

Tabelle 35: Energieinhalte der hier untersuchten Sortimente für Fichten- und Buchenholz bei verschiedenen Wassergehalten (zu den hier verwendeten Umrechnungsfaktoren von Festmeter in die Raummetermaße vgl. Tabelle 31)

			Energieinhalt in Litern Heizöläquivalent (l OE)[b]				
	Wasser-gehalt w	Heiz-wert[a]	Fest-meter[c]	1 m unge-spalten	1 m ge-spalten	33-cm Scheite geschichtet	33-cm Scheite lose (geschüttet)
	%	MJ/kg	l OE/Fm	l OE/Rm	l OE/Rm	l OE/Rm	l OE/Rm
Buche, ofenfertig	15	15,27	304	179	154	189	128
Buche, angetrocknet	30	12,15	269	158	136	167	113
Fichte, ofenfertig	15	15,53	204	131	113	131	81
Fichte, angetrocknet	30	12,36	186	120	103	120	74

[a] Heizwerte (wasserfrei) nach NAWARO Datenbank des TFZ [24]: Buche 18,4 MJ/kg und Fichte 18,7 MJ/kg

[b] Umrechnung: 1 Liter Heizöl (l OE) entspricht 10 Kilowattstunden (kWh) oder 36 Megajoule (MJ)

[c] Rohdichten (wasserfrei) für Buchen- und Fichtenholz: 0,68 bzw. 0,43 g/cm³ gemäß [39] bei der Dichteberechnung für den angegebenen Wassergehalt wurde ab dem jeweiligen Fasersättigungspunkt eine lineare Schwindung und ein Schwindmaß von 17,9 % (Buche) bzw. 11,9 % (Fichte) angerechnet [39], damit beträgt die tatsächliche Dichte des Fichtenholzes bei 15 und 30 % Wassergehalt 0,425 bzw. 0,516 g/cm³ und bei Buchenholz 0,716 bzw. 0,798 g/cm³.

5.6.3 Fehlerbetrachtungen

Die neuen Umrechnungsfaktoren deuten zwar auf eine höhere Volumenausbeute für Scheitholz je Festmeter hin, im Umkehrschluss ist aber auch die berechnete Energiemenge, die nun einem Raummeter geschichtetes Holz zugeordnet werden kann, niedriger. Dies liegt am geringer berechneten Rohholzvolumen im Vergleich zur Anwendung der bisherigen pauschalen Faktoren (vgl. hierzu Tabelle 35). Aufgrund der weitreichenden Bedeutung der Umrechnungsfaktoren sollen nachfolgend einige Betrachtungen über die gegebenen Messunsicherheiten bei der gewählten Bestimmungsmethode angestellt werden.

Das für die vorliegende Untersuchung verwendete Holz stammt aus einer Jungdurchforstung, da hier die für Brennholz typischen Sortimente anfallen. Die Fichten- und Buchenrundhölzer wiesen einen Durchmesser von 6 cm bis maximal 25 cm auf. Dieser Bereich wurde in der Untersuchung als repräsentativ angesehen. Bei größeren Durchmessern besteht die Möglichkeit, dass das Holz durch seinen weniger gekrümmten Wuchs weniger hohl lagert und sich somit ein günstigerer Festmetergehalt je Raummeter errechnet. Bei kleineren Durchmessern trifft das Gegenteil zu. Diese Trends gelten vor allem für die eher gekrümmt-wüchsigen Laubholzsortimente. Inwieweit das hier verwendete Ausgangsmaterial repräsentativ für die Gesamtheit der Brennholz-Rohsortimente gelten kann, ist kaum zu bewerten.

Die Volumenbestimmung wurde hier durch sektionsweise (1 m) Kluppung vorgenommen. Im Vergleich zur Volumenbestimmung längerer Hölzer wird ein möglicher Messfehler durch die Abholzigkeit der Bäume hierbei weitgehend vermieden. Allerdings könnte diese Messunschärfe eine Rolle spielen, wenn der bisher verwendete pauschale Umrechnungsfaktor (dessen Zustandekommen nicht nachvollzogen werden kann) auf Basis von Langholzvolumina errechnet worden wäre.

Deutlichere Messabweichungen könnten durch die hier bei der Kluppung durchgeführte forstliche Abrundung auf ganze Zentimeter (Kapitel 4.4.2) verursacht worden sein, obgleich dieses Vorgehen für die Bestimmung des pauschalen Umrechnungsfaktors ebenfalls als sehr wahrscheinlich angenommen werden kann. Durch die forstliche Abrundung kommt es zu einer systematischen Abweichung bei der Durchmesserbestimmung, wobei der prozentuale Fehler mit zunehmendem Durchmesser abnimmt. Dieser systematische Fehler liegt im Durchschnitt zwischen -3 % und -6 % [36]. Werden die Volumina der verwendeten Holzrundlinge mit der Erhöhung des Durchmessers mit dem durchschnittlichen Fehler bei der Kluppung von 0,45 cm (0,1 cm bis 0,9 cm werden abgerundet; im Mittel folglich 0,45 cm) neu berechnet, so wirkt sich dieser Fehler auf den Umrechnungsfaktor für Rundholz mit bis zu vier Hundertstel Erhöhung aus (hier z. B. von 0,60 auf 0,64 Fm/Rm).

Da Brennholz meist "in Rinde" gehandelt und verbrannt wird, wurde kein Rindenabzug berechnet. Bei einer stichprobenhaften Messung stellte sich heraus, dass die Rinde bei den vorliegenden Rundhölzern ca. 0,5 cm stark war. Wenn für die Umrechnungsfaktoren ein Festmeterwert "ohne Rinde" gesucht würde, so verschöbe sich der Faktor für Rundholz um drei Hundertstel nach unten (z. B. von 0,60 auf 0,57 Fm/Rm).

Beim Verkauf von Schichtholz im Wald ist von forstlicher Seite normalerweise ein Übermaß von 4 % vorgeschrieben [36]. Diese Gepflogenheit wurde hier nicht berücksichtigt. Ein Messfehler (oder Übermaß) von einem Zentimeter würde sich bei der hier verwendeten Messmethode im Messrahmen beim Umrechnungsfaktor erst in der dritten Nachkommastelle (ca. 6 Tausendstel) auswirken.

In gleicher Weise lassen sich die möglichen Randeffekte, d. h. eine möglicherweise höhere Hohlraumbildung an den Wandflächen des Stapelrahmens, beurteilen. Würde man diese Messunschärfe für beide Seitenwände und für die Füllhöhe mit 1 cm ansetzen, so ergäbe das einen Einfluss von 18 Tausendstel auf den Umrechnungsfaktor. Das würde zum Beispiel für Rundholz einen Anstieg von 0,60 auf 0,618 Fm/Rm bedeuten. In der Praxis kommen sowohl Großstapel oder -schüttungen mit wenigen Randeffekten als auch Kleincontainersysteme (z. B. Gitterboxen oder Palettenkisten) mit ähnlichen Abmessungen wie beim hier für die Messungen verwendeten Stapelrahmen zur Anwendung. Inwieweit derartige Randeffekte tatsächlich eine relevante Größenordnung einnehmen und daher differenziert berücksichtigt werden sollten, kann hier nicht beurteilt werden. Die Randeffekte sind ohnehin nur relevant für die Umrechnung der Scheitholzsortimente in das Festmetermaß. Für eine Umrechnung der Holzsortimente untereinander spielen sie keine Rolle, da die Umrechnungsfaktoren die Quotienten der jeweiligen Volumina bei gleicher Ursprungsmenge darstellen, wodurch sich ein möglicher systematischer Messfehler nicht auswirken kann (vgl. Kapitel 4.4.4).

6 Prozesskettenanalyse

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Ergebnisse zu den verschiedenen Teilverfahren und – wo möglich – auch differenziert nach deren Arbeitsablaufabschnitten dargestellt. Die Teilverfahren (z. B. Scheitholzaufbereitung) stellen aber letztlich stets nur einen Baustein einer vollständigen Verfahrenskette dar. Da sie sich außerdem auch auf die nachgelagerten Verfahrenselemente auswirken, ist eine abschließende Bewertung erst im Verbund mit den weiteren vor- oder nachgelagerten Verfahrensschritten möglich. Nachfolgend soll der Versuch einer aggregierten Gesamtbewertung unternommen werden, wobei unterschiedliche Bausteine einer Verfahrenskette beispielhaft miteinander kombiniert werden.

6.1 Praxisübliche Verfahren (Befragung von Selbstwerbern)

Um Anhaltspunkte für die bei Selbstwerbern typischen Verfahrensabläufe, die verwendeten Arbeitsgeräte sowie die sonstigen Rahmenbedingungen zu erhalten, wurde eine Umfrage durchgeführt. Dazu wurde eine Auswahl von Selbstwerber mittels Fragebogen zu ihren Produktionsmethoden befragt. Exemplarisch wurde hierfür der Staatswald des damaligen Freisinger Forstamtes ausgewählt. Die Fragen waren vom TFZ und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft gemeinsam ausgearbeitet worden. Die jeweiligen Förster wurden gebeten, mit den Selbstwerbern den Fragebogen auszufüllen und an die Landesanstalt zurückzusenden. Insgesamt beteiligten sich 81 Personen an der Erhebung. Sie stellt somit lediglich eine kleine Stichprobe dar, die aber eine grobe Orientierung für die im nachfolgenden Kapitel 6.2 vorgestellte Definition der Modellverfahrensketten bieten sollte. Die Ergebnisse der Befragung sind in Tabelle 36 und in Abbildung 113 und Abbildung 114 zusammengestellt. Der vollständige Fragebogen findet sich im Anhang 11.2.

Tabelle 36: Ergebnisse der Befragung von Selbstwerbern. Die Reihenfolge entspricht den Nummern der Fragen im Fragebogen (vgl. Anhang 11.2). Durch Rundungsunschärfen oder bei Mehrfachnennungen ergibt die Summe nicht immer genau 100 %

Nr.	Frage	Antworten					N[b]
1	welcher Bedarf?	Eigenbedarf 81 %	Verkauf 3 %	teils-teils 16 %			81
2	bei Eigenbedarf: welche Feuerung?[a]	Kaminofen 25 %	Kachelofen 65 %	Zentralheizung 12 %	Heizungsherd 19 %		98
3	aufgearbeitete Baumarten[a]	Fichte 88 %	Buche 19 %	Eiche 12 %	Pappel 7 %	Sonst. 47 %	140
4	Was wird aufgearbeitet?[a]	Hiebsreste 59 %	Jungdurchf. 61 %	gerückt.Holz 4 %	Sonstiges 3 %		102
5	im Wald aufgearbeitete Länge	1 m 77 %	50 cm 6 %	33 cm 7 %	25 cm 2 %	Sonst. 7 %	81
6	Länge des Endprodukts	1 m 1 %	50 cm 13 %	33 cm 66 %	25 cm 18 %	Sonst. 2 %	81
7	Wie viele Raummeter pro Jahr?	bis 10 42 %	11–20 38 %	21–30 10 %	31–40 1 %	41 bis 70 6 %	81
8	Von wo erfolgt Abtransport aus dem Wald?	Bestand 6 %	Rückegasse 12 %	Waldstraße 24 %	gar nicht 57 %		81
9	Wo wird verkaufsfertig gespalten?	Bestand 0 %	Rückegasse 0 %	Waldstraße 5 %	zu Hause 94 %	gar nicht 1 %	81
10	Wo wird verkaufsfähig gelagert und getrocknet?	Bestand 0 %	Rückegasse 0 %	Waldstraße 0 %	zu Hause 100 %		81
11a	Dauer der Freilufttrocknung Hartholz (Jahre)	0,5 J 3 %	1 J 5 %	1,5 J 10 %	2 J 33 %	>2 J 48 %	81
11b	Dauer der Freilufttrocknung Weichholz (Jahre)	0,5 J 3 %	1 J 19 %	1,5 J 31 %	2 J 38 %	>2 J 10 %	81
12	Wie oft wird jährlich im Wald gearbeitet?	bis 2 mal 15 %	3–5 mal 36 %	>5 mal 49 %			81
13	Wieviele Jahre Erfahrung?	1–2 Jahre 6 %	3–5 Jahre 17 %	>5 Jahre 77			81
14	Wie viele Personen sind im Wald dabei?	1 Pers. 7 %	2 Pers. 24 %	3 Pers. 52 %	4 Pers. 17 %		81
15	Welche Maschinen werden verwendet?[a]	Motorsäge 100 %	Traktor 56 %	Seilwinde 5 %	Sonstige 2 %		132
16	Transport vom Bestand zur Rückegasse[a]	händisch 94 %	mit Seil 15 %	Sonstiges 1 %			89
17	Transport an die Waldstraße[a]	PKW+Anh. 31 %	Traktor+Anh. 64 %	Sonstiges 9 %			84
18	Transport zum Lagerplatz[a]	PKW+Anh. 36 %	Traktor+Anh. 63 %	Sonstiges 4 %			83
19	Welche Maschinen für Spalten und Schneiden	siehe Grafik					
20	Geschätzter mittl. Zeitbedarf je Rm (Meterholz)	siehe Grafik					

[a] Mehrfachnennungen möglich [b] gesamte Anzahl Nennungen (ggf. inkl. Mehrfachnennungen)

Die Ergebnisse in Tabelle 36 zeigen, dass die deutlich überwiegende Mehrheit der hier befragten Selbstwerber (81 %) das Holz nur für den Eigenbedarf bereitstellt. In der Mehrzahl wird es in Kachelöfen eingesetzt (65 %). Offenbar greifen die Kaminofenbesitzer, die bei den Feuerungsbetreibern generell deutlich überwiegen dürften und im Durchschnitt kleinere Mengen benötigen, eher auf andere Holzquellen zurück. Außerdem wird in derartigen Feuerungen bevorzugt das im Befragungsgebiet eher seltenere Hartholz eingesetzt. Das zeigt auch die Antwort auf die Frage nach den am meisten verwendeten Baumarten, bei denen die Fichte (88 %) überwiegt, gefolgt von der Buche (19 %). Als „Sonstige" wurde meistens die Esche (Fraxinus excelsior) angegeben. Ingesamt halten sich die Hiebsreste/Käferholz (59 %) und die Jungdurchforstung (61 %) die Waage. Es wird kaum vorgerücktes Holz verwendet.

Im Wald wird das Holz erwartungsgemäß auf eine Länge von 1 m aufgearbeitet (77 %) Unter „Sonstige" wurden neben Sondermaßen wie beispielsweise 30 cm auch Fixlängen über 1 m (z. B. 2 m) angegeben. Die am meisten verwendete Scheitlänge für das ofenfertige Endprodukt beträgt 33 cm (66 %). Manche Selbstwerber begnügen sich mit zwei Raummetern pro Jahr, andere wiederum stellen jährlich über 50 Raummeter bereit. Die typische Selbstwerberproduktion in Freising liegt jedoch bei ca. 15 Rm pro Jahr. Insgesamt liegen 80 % der Befragten unter 20 Rm/a (Tabelle 36).

Meistens wird das an die Waldstraße gerückte Holz direkt in den Transporter verladen und nicht erst vorher noch einmal aufgesetzt (57 %). Es wird fast ausschließlich am heimatlichen Lagerplatz verkaufsfertig gespalten (94 %). Auch die Lagerung bis zur Endnutzung bzw. bis zum Verkauf erfolgt uneingeschränkt am Lagerplatz zu Hause (100 %). Das Hartholz (Buche, Eiche, Esche etc.) wird dabei bis zum Einsatz- oder Verkaufszeitpunkt überwiegend zwei und mehr Jahre gelagert (81 %). Beim Weichholz (Nadelbaumarten, Pappel, Weide) ist die Lagerungsdauer verkürzt, hier sind es nur noch 48 % der Befragten, die über zwei und mehr Jahre lagern (Tabelle 36).

Für die angegebenen Brennholzmengen müssen die Befragten überwiegend mehr als fünfmal im Wald arbeiten. Eine große Mehrheit (77 %) hat bereits eine mindestens 5-jährige Erfahrung bei der Brennholzaufbereitung im Wald. Die meisten Selbstwerber arbeiten zu dritt bei der Holzernte (52 %), aber ein kleiner Teil (7 %) arbeitet trotz der Unfallgefahr immer noch allein. Alle Befragten besitzen eine Motorsäge. Nur sehr wenige Befragte (5 %) setzen zusätzlich eine Seilwinde ein (Tabelle 36).

Überwiegend wird das Holz von Hand (94 %) aus dem Bestand heraustransportiert. Für den Weitertransport an die Waldstraße kommen überwiegend Traktoren mit Anhänger (64 %) aber auch PKW mit Anhänger (31 %) zum Einsatz. Fast gleichartig erfolgt auch der Transport zum Lager- bzw. Aufbereitungsplatz. Dort wird immer noch sehr häufig die Axt oder der Spalthammer eingesetzt (22 % bzw. 40 %). Am meisten allerdings findet der hydraulisch betriebene Senkrechtspalter Verwendung (60 %). Zum Ablängen wird die Kreissäge oder auch noch die Motorsäge verwendet. Nur sehr wenig wurde von den hier Befragten eine kombinierte Säge-Spalt-Maschinen eingesetzt (Abbildung 113). Unter „Sonstige" wurden „Bügelsäge" und „Keil" genannt. Bei der Einschätzung des Arbeitszeitbedarfs pro Raummeter gehen die Angaben naturgemäß weit auseinander, zumal hier auch Angaben für eine unterschiedliche Anzahl beteiligter Personen gemacht werden (vgl. Frage 14). Die Bandbreite reicht von 0,2 Stunden bis zu zehn Stunden pro Rm, wobei Nennungen von 1 bis 2 Stunden relativ häufig sind (Abbildung 114).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Selbstwerber, die als wichtige Akteure bei der Scheitholzgewinnung einzuschätzen sind, sehr unterschiedlich vorgehen und auch eine unterschiedliche Maschinenausstattung besitzen. Zwar hat der Senkrechtspalter großenteils die Axt abgelöst, jedoch werden nur wenige kombinierte Säge-Spaltmaschinen eingesetzt.

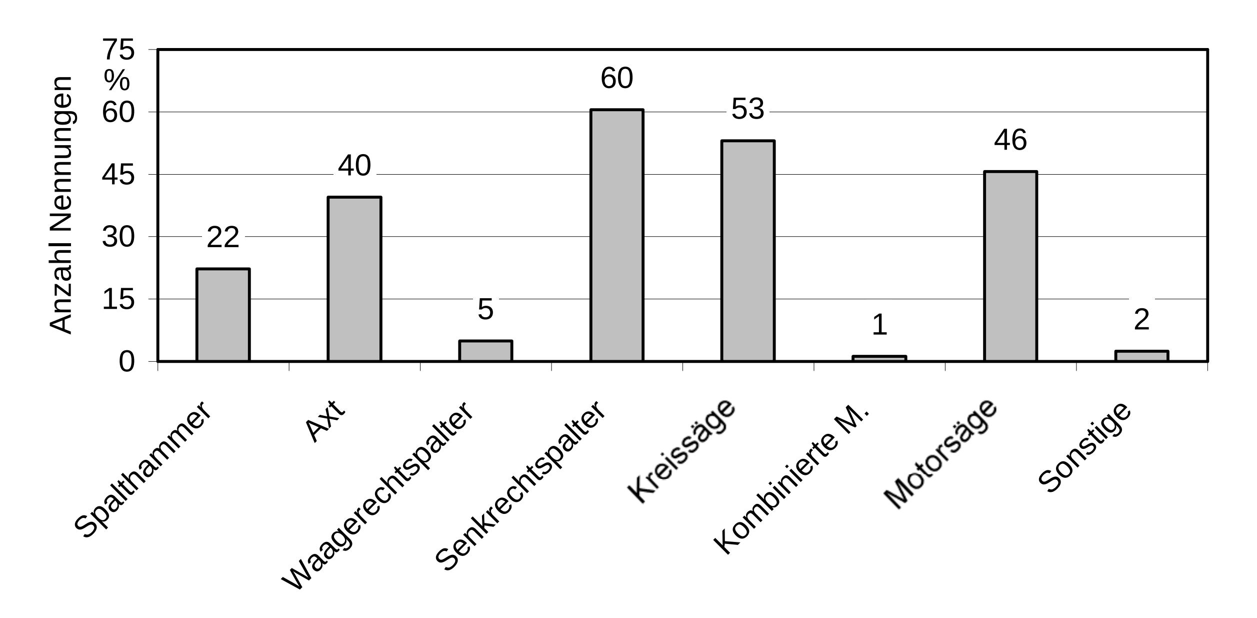


Abbildung 113: Von Befragten verwendete Maschinen und Geräte beim Spalten

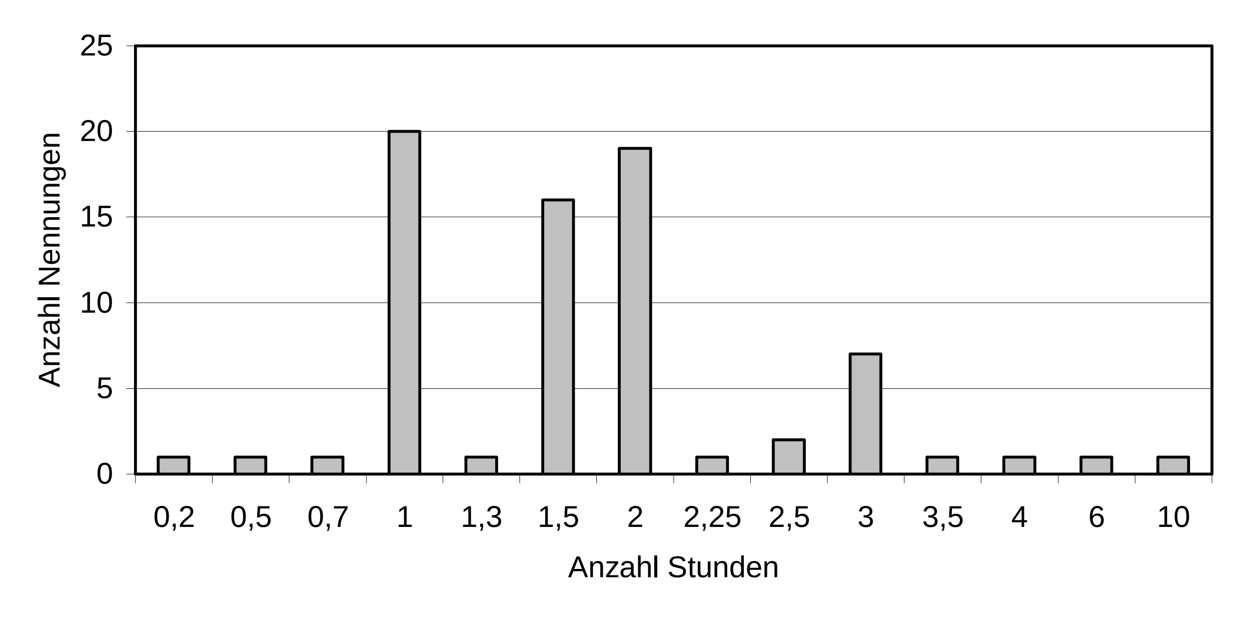


Abbildung 114: Von Befragten geschätzter mittlerer Zeitbedarf je Rm Holzwerbung im Wald (Meterholz)

6.2 Berechnungen für Modellprozessketten

6.2.1 Definition der Prozessketten

Aus der Vielfalt der Arbeitsabläufe wurden vier Scheitholzproduktionsketten gebildet und bestimmten Akteuren zugeordnet, die sich durch Gemeinsamkeiten bei der Scheitholzproduktion definieren. Die vier Scheitholzproduktionsketten unterscheiden sich in den Produktionszielen (z. B. Eigennutzung oder gewerbliche Holzproduktion) und somit auch im Grad der eingesetzten Mechanisierung. Letztlich wird davon natürlich auch die jährlich produzierte Menge an Scheitholz beeinflusst, die somit ein messbares Zuordnungsmerkmal darstellt. Abbildung 115 zeigt die betrachteten Produktionspfade in einem Fließschema.

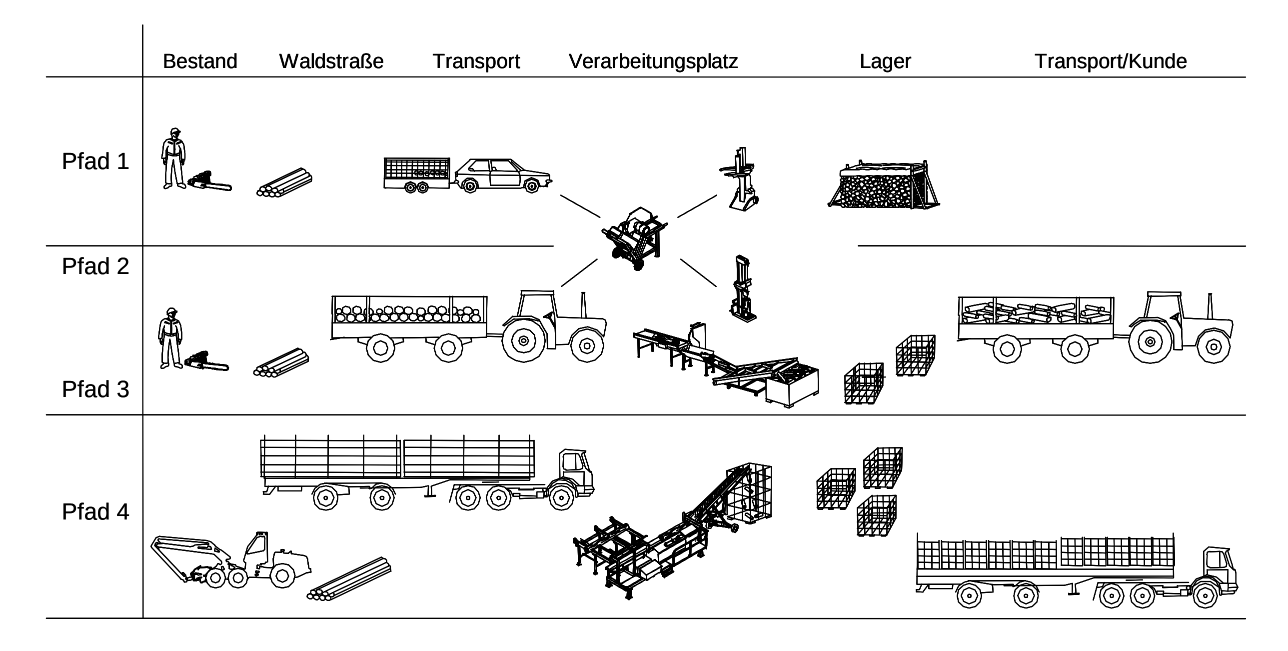


Abbildung 115: Schema der unterschiedlichen Scheitholzbereitstellungsketten

Die Grenzen zwischen den Prozessketten sind fließend, so dass die hier getroffene Festlegung auf vier Modellfälle lediglich eine grobe Orientierung bietet, in der sich der Betrachter mehr oder weniger gut wiederfinden kann. Das liegt auch daran, dass für weitere Berechnungen zu den Prozessketten (vor allem bei den aggregierten Kosten, vgl. Kapitel 6.2.5.3) weitere Annahmen getroffen werden mussten, die den Modellfall charakterisieren. Generell kommen in den Aggregierungen vor allem aber die in den vorangegangenen Kapiteln gemessenen Werte zur Anwendung.

Die vier definierten Prozessketten ("Pfade") werden nachfolgend vorgestellt und charakterisiert. Für alle Berechnungen wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass die Entfernung vom Wald zur Hofstelle bzw. zum Aufarbeitungsplatz 2 km beträgt und dass diese Strecke sich zur Hälfte aus Wald-/Feldwegen sowie aus asphaltierten Straßen zusammensetzt.

Pfad 1: "Freizeit-Selbstwerber". Werden weniger als 15 Rm Scheitholz im Jahr produziert, so ist das Holz im allgemeinen ausschließlich für den Eigenbedarf bestimmt. Das Vorgehen und die Ausstattung an Maschinen ist weniger professionell. Der Akteur ist ein Selbstwerber, ausgestattet

mit einer Motorsäge. Er fällt nur das ihm zugewiesene Schwachholz oder bedient sich der Holzerntereste. Das Holz wird in Meterstücken aus dem Bestand an die Waldstraße getragen. Der Transport erfolgt mit einem PKW-gezogenen Anhänger nach Hause. Dort wird das Holz mit der Motorsäge oder einer Kreissäge weiter gekürzt und dann entweder mit der Axt oder einem kleinen Senkrechtspalter gespalten, um es anschließend in einem Lager auf dem eigenen Grundstück geschichtet zu trocknen. Da diese Methode meist zur Selbstversorgung angewandt wird erfolgt kein weiterer Transport zum Kunden. In Stichworten ist die Verfahrenskette somit wie folgt zu beschreiben.

Pfad 1: Holzernte Selbstwerber (inkl. Rücken, Länge 1 m) → Beladen → Transport (PKW mit Anhänger) → Abladen (kippen) → Sägen (Brennholzkreissäge oder Motorsäge) → Spalten (kleiner Senkrechtspalter) → Schichten (inkl. Lagerung)

Pfad 2: "Waldbauer 1, gering mechanisiert". Bei einer Jahresproduktion zwischen 15 Rm und 200 Rm müssen verstärkt Rationalisierungsprozesse eintreten, um eine ausreichende Arbeitseffizienz zu erreichen. Der Akteur ist meist ein Landwirt mit eigenem Wald oder ein gewerblicher Brennholzhändler. Der Transport erfolgt mit Traktor und Anhänger zum Aufarbeitungsplatz, der sich meist auf dem Hofgelände befindet. Zum Ablängen kommt eine Motor- oder Kreissäge zum Einsatz und zum Spalten wird ein großer Spalter verwendet. Bei der Lagerung wird gespaltenes Meterholz geschichtet und kürzere Scheite werden in Boxen geschüttet. Der Transport zum Kunden wird mit traktorgezogenen Anhängern durchgeführt, wobei eine mittlere Entfernung von 5 km (asphaltierte Straße) angenommen wird. In Stichworten lässt sich die unterschiedliche Mechanisierung dieser Modellverfahrenskette wie folgt beschreiben.

Pfad 2: Holzernte Selbstwerber (inkl. Rücken, Länge 1 m) → Transport (Traktor und Anhänger inkl. Beladen und Abladen mit Kran) → Spalten (großer Senkrechtspalter) → Stapeln (inkl. Lagerung) → Sägen (Brennholzkreissäge auf 33 cm) → Beladen → 5 km Transport zum Kunden → Abladen (Kippen)

Pfad 3: "Waldbauer 2, höher mechanisiert". Bei dieser Prozesskette beginnt der Rationalisierungsprozess bereits bei der Holzernte, bei der die Rohholzsortimente 2 bis 5 m lang sind und auch mit Seilzugunterstützung gerückt werden. Auch hier ist der Akteur meist ein Landwirt mit eigenem Wald oder ein kleingewerblicher Brennholzhändler, der als Selbstwerber im fremden Wald auftritt. Der Transport erfolgt mit Traktor und Anhänger zum Aufarbeitungsplatz auf dem Hofgelände. Im Unterschied zu Pfad 2 ist aber kein Ablängen mit Motor- oder Kreissäge erforderlich, da das Aufarbeiten mit einer kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine durchgeführt wird. Bei der Lagerung werden die Kurzscheite in Boxen geschüttet. Der Transport zum Kunden wird wieder mit traktorgezogenen Anhängern durchgeführt, wobei eine mittlere Entfernung von 10 km (asphaltierte Straße) angenommen wird. Die Modellverfahrenskette "Pfad 3" ist nachfolgend in Stichworten zusammengefasst.

Pfad 3: Holzernte Selbstwerber (inkl. Rücken, Länge 2 bis 5 m) → Transport (Traktor und Anhänger inkl. Beladen und Abladen mit Kran) → Beladen der Spaltmaschine → Bearbeiten mit der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine → Lagerung → Beladen → 10 km Transport zum Kunden inkl. Abladen (Kippen)

Pfad 4: "professionelles Scheitholzgewerbe". Bei einer Jahresproduktion von deutlich über 200 Rm wird Scheitholz auf professionell betriebenen sogenannten "Biomassehöfen" produziert und verkauft. In dieser hochmechanisierten Produktionskette wird für die Holzernte ein Harvester eingesetzt, wobei für die Scheitholzproduktion das als Papierholz oder Industrieholz sortierte Holz verwendet wird. Das Holz wird mit Rundholz-LKW zum Bearbeitungsplatz transportiert, dann je nach Sortiment mit verschiedenen Maschinen (in diesem Fall eine große kombinierte Sägespaltmaschine) verarbeitet und in Gitterboxen oder auf großen Haufenlagern geschüttet gelagert. Der Transport zum Kunden findet mit LKW statt, wobei eine mittlere Entfernung von 15 km (asphaltierte Straße) angenommen wird. In Stichworten lässt sich diese Modellverfahrenskette wie folgt beschreiben.

Pfad 4: Holzernte professionell (Länge 5 – 8 m) → Transport (Langholztransport) → Beladen der Maschine (Greifzange) → Bearbeiten mit der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine → Lagerung → Beladen → 15 km Transport zum Kunden inkl. Abladen (Kippen)

Aus den Arbeitszeiten in Tabelle 37 (Kapitel 6.2.3) und den unterstellten Maschinenauslastungen in Tabelle 41 (Kapitel 6.2.5.1) ergibt sich rechnerisch in den Prozessketten die folgende jährliche theoretische Gesamtproduktion für die eingesetzten Scheitholzaufbereitungsmaschinen, durch die die Prozesskette hier zusätzlich charakterisiert werden soll:

- Pfad 1: 97 Rm (33-er Scheite, gestapelt)
- Pfad 2: 131 Rm (33-er Scheite, gestapelt)
- Pfad 3: 658 Rm (33-er Scheite, gestapelt)
- Pfad 4: 3511 Rm (33-er Scheite, gestapelt)

Dabei muss diese Gesamtproduktion nicht notwendigerweise in einem einzigen Betrieb stattfinden, sondern kann – vor allem bei den Pfaden 1 bis 3 – auch durch überbetrieblichen Maschineneinsatz von verschiedenen Maschinennutzern erwirtschaftet werden.

6.2.2 Arbeitszeitbedarf in den Prozessketten

Der aggregierte spezifische Arbeitszeitbedarf wurde für jede der in Kapitel 6.2 vorgestellten Prozessketten einheitlich berechnet auf einen Festmeter Holz, der zu 33 cm langen Scheiten aufgearbeitet und – außer beim Freizeit-Selbstwerber (Pfad 1) – ofenfertig zum Kunden ausgeliefert wird. Tabelle 37 zeigt die Ergebnisse dieser Aggregierung und visualisiert zugleich die einzelnen Verfahrenselemente, aus der sich die jeweilige Prozesskette zusammensetzt. Die Daten für Holzernte, Ablängen, Spalten und Schichten wurden aus den jeweiligen Durchschnittsangaben der Arbeitszeitmessungen in den Kapiteln 5.1 und 5.2 entnommen. Die übrigen Zeiten für Laden, Abladen, Transport und Beschicken stammen aus Nebenrechnungen bzw. aus Literaturangaben.

Bei den Transporten mit landwirtschaftlichen Fahrzeugen wurde eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 25 und 15 km/h bei Straßen- bzw. Feldwegfahrten angenommen, der PKW-Transport erfolgt mit durchschnittlich 40 km/h. Bei LKW-Transporten wurde eine Fahrgeschwindigkeit unterstellt, die auf Planungsdaten des Bundesverbandes Deutschen Güternahverkehrs e.V. (BDN) zurückgehen, wobei hier aus den Angaben eine entfernungsabhängige Geschwindigkeitsformel abgeleitet wurde; sie gilt für den Entfernungsbereich bis 50 km und wird bei BDN [11] beschrie-

ben. Für die hier unterstellten 15 km beträgt die solchermaßen errechnete mittlere Geschwindigkeit 32 km/h.

Bei der Abschätzung der je Transportmittel transportierten Frachten wurden die Volumina der Anhänger, die bei den durchgeführten Zeitstudien verwendet wurden, zugrunde gelegt. Dies war bei dem PKW-Anhänger ein Ladevolumen von 5,4 m³ und beim Traktor-Anhänger 10 m³, die auf das Ladevolumen von ungespaltenen Meterrundlingen umgerechnet wurden (3,32 Fm bzw. 6,42 Fm). Beim LKW wurde eine typische Lademenge von 10 Fm angenommen. Der Zeitbedarf für das Laden von Hand entstammt der Zeitstudie für des Beladen einer Bündelhilfe mit Meterholz-Rundlingen und betrug 3,3 Fm/AKh. Für das Abladen beim Kunden wurde ein rasches Abkippen unterstellt, wobei der Zeitbedarf hierfür auf 0,07 Stunden festsetzt wurde, so dass sich je nach Ladevolumen die hieraus unterschiedliche Teilverfahrenskosten ergeben. Beim Zeitbedarf für das Laden mit Kran wurde dagegen auf Zeitstudien nach PAUSCH [46] zurückgegriffen, demnach liegt die Leistung für das Beladen mit Kran bei 60 Fm/h und für das Entladen bei 83 Fm/h.

Die in Tabelle 37 dargestellte Summe der Teilarbeitszeiten zeigt, dass die Bandbreite des spezifischen Arbeitszeitbedarfs zwischen von 5,7 Stunden je Festmeter Kurzholz (Pfad 1) und 0,49 h/Fm (Pfad 4) liegt. Eine arbeitswirtschaftliche Verbesserung durch eine zunehmende Mechanisierung wird besonders beim Wechsel von Pfad 2 (Waldbauer 1, gering mechanisiert) auf Pfad 3 (Waldbauer 2, höher mechanisiert) sichtbar. Hier reduziert sich der Zeitbedarf der gesamten Prozesskette deutlich von 4,2 Stunden je Festmeter Brennholz (Pfad 2) auf nur noch 1,27 h/Fm (Tabelle 37). Dabei wirkt sich vor allem die effizientere Holzerntetechnik durch das Aushalten längerer Rundhölzer und Verwendung einer Seilwinde sowie der Einsatz einer kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine bei der Scheitholzaufbereitung positiv, d.h. zeitmindernd, aus.

Tabelle 37: Durchschnittlicher spezifischer Arbeitszeitbedarf je Festmeter Scheitholz (hier: als 33 cm Scheite) in den einzelnen Prozessketten (Zeitangaben als reine Arbeitszeit, RAZ, vgl. Kapitel 4.1)

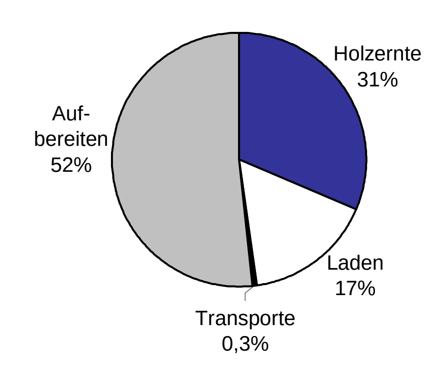
Verfahrensschritt	Pfad 1 Freizeit-Selbstwerber (AKh/Fm)	Pfad 2 Waldbauer 1, gering mechanisiert (AKh/Fm)	Pfad 3 Waldbauer 2, höher mechanisiert (AKh/Fm)	Pfad 4 Professionelles Scheitholzgewerbe (AKh/Fm)
Holzernte + Rücken (Selbstwerber, 1 m)	1,79	1,79	-	-
Holzernte + Rücken Traktor/Seilwinde	-	-	0,70	-
Holzernte (Jungdurchforstung, Harvester)	-	-	-	0,10
Holzernte Rücken (Jungdurchforst., Forwarder)	-	-	-	0,10
Laden (33 cm von Hand, geschüttet, lose)	-	-	-	-
Laden (33 cm maschinell, geschüttet, lose)	-	-	0,01	0,01
Laden (1 m ungespalten, von Hand)	0,30	0,30	-	-
Laden (mit Kran)	-	-	0,02	0,02
Transport (PKW + Anhänger)	0,02	-	-	-
Transport 1 (Traktor + Anhänger)	-	0,02	0,02	-
Transport 2 zum Kunden (Traktor + Anhänger)	-	0,04	0,08	-
Transport 1 Verarbeitungsplatz (LKW)	-	-	-	0,01
Transport 2 zum Kunden (LKW)	-	-	-	0,05
Abladen 1 (kippen)	0,01	0,01	0,01	0,01
Abladen 2 beim Kunden	-	0,01	-	-
Abladen (Kran)	-	-	0,01	0,01
Ablängen Kreissäge (auf 33 cm)	0,63	0,63	-	-
Spalter klein	2,33	-	-	-
Spalter groß	-	0,67	-	-
Beschicken maschinell (mit Kran)	-	-	0,02	-
Kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	0,40	-
Große kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	-	0,17
Schichten (33 cm gespalten)	0,63	0,63	-	-
Summe Zeitbedarf (AKh/Fm):	5,70	4,24	1,27	0,49
Zum Vergleich: Zeitbedarf in AKh/Rm (33 cm Scheite, gestapelt)[a]	3,59	2,67	0,80	0,31

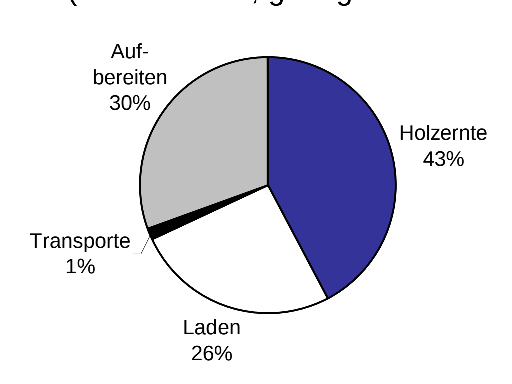
[a] Zu den verwendeten Faktoren für die Umrechnung von Festmeter zu 33-er Scheiten (gestapelt) siehe Kapitel 5.6.1

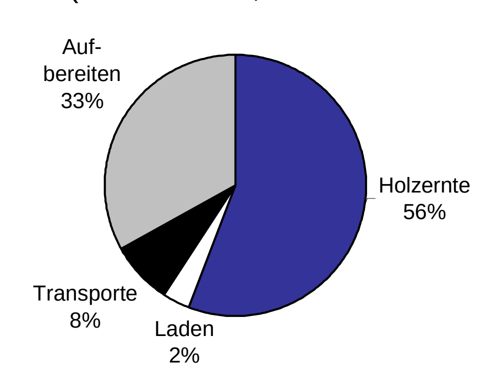
Über die in Kapitel 5.6.1 genannten Volumen-Umrechnungsfaktoren errechnet sich die Angabe der Arbeitszeitsumme für einen Raummeter ofenfertige Kurzscheite (33 cm). Er beträgt demnach zwischen 3,59 und 0,31 AKh/Rm (Tabelle 37). Inwieweit sich dieser unterschiedliche Arbeitszeitaufwand in den Gesamtkosten niederschlägt, hängt allerdings von dem Wert bzw. den Kosten einer Arbeitskraftstunde ab. Entsprechende Kostenbetrachtungen finden sich in Kapitel 6.2.5.

Bei der Betrachtung der Zeitanteile, die in Abbildung 116 für die einzelnen Phasen der Bereitstellungskette zusammengestellt sind, wird ersichtlich, dass die Aufbereitung beim Wechsel zum höher mechanisierten Verfahren anteilig tendenziell zurückgeht, nur beim Selbstwerber nimmt sie den größten Zeitanteil in Anspruch. Bei einer besonders effizienten Produktion wie in Pfad 4 wei-

sen die beiden Phasen "Holzernte" und "Aufbereiten" ungefähr gleiche Zeitanteile auf (ca. 40 %), den Rest teilen sich die Transporte und das Laden mit jeweils ca. 10 %. Verschieben sich diese Anteile deutlich, so weist dies auch auf größere Rationalisierungsreserven in einem Teilverfahren hin. Im Pfad 3 liegen diese Reserven beispielsweise bei der Holzernte, die einen 56%igen Anteil einnimmt, oder beim Pfad 2 erweist sich das Laden mit 26 % Anteil als besonders zeitraubend, und beim Pfad 1 ist es das Aufarbeiten (52 %). Der von Pfad 1 bis 4 ansteigende Anteil der Transporte von 0,3 % auf 11 % zeigt dagegen den steigenden Logistikaufwand für die Bewältigung des zunehmenden Umsatzes von Scheitholz und für den größeren Wirkungsradius beim Vertrieb.







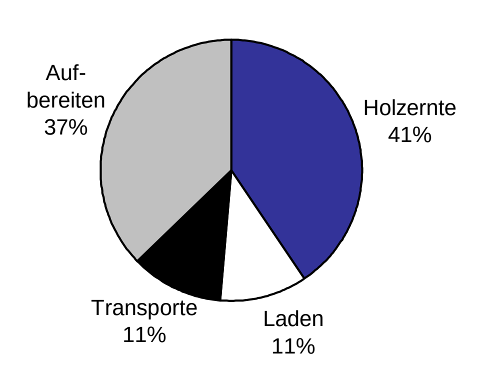


Abbildung 116: Arbeitszeitanteile verschiedener Phasen der Scheitholzbereitstellung, dargestellt für die vier ausgewählten Modellverfahrensketten. Holzernte: Holzernte mit Rücken. Transporte: Hin- und Rück Wald-Bearbeitungsplatz-Kunde. Laden: Be- und Entladen und Aufschichten. Aufbereiten: Ablängen, Spalten, Beschicken

6.2.3 Arbeitsschwere in den Prozessketten

Bei der Aggregierung der Arbeitsschwere wurden die nach der OWAS-Methode bestimmten Belastungsindizes der Verfahrenselemente (vgl. Kapitel 5.3.2) gemäß ihres spezifischen Zeitanteils zur Verarbeitung eines Festmeters gewichtet, um die Belastung ganzer Pfade unterscheiden und vergleichen zu können. Bei dieser Gewichtung wurden als Zeitanteile die in Kapitel 6.2.2 (Tabelle 37) dargestellten Teilverfahrens-Arbeitszeiten verrechnet.

Die so ermittelten OWAS-Summenwerte sind in Tabelle 38 dargestellt. Sie zeigen eine Spannweite von 168 bis 106, d. h. von einer „eher belastenden“ Arbeit (vgl. Bewertung OWAS 5.3.5) bis zu einer „kaum belastenden“ Arbeit. Hierbei ist zu erwähnen, dass die OWAS-Werte für ausschließlich sitzend durchgeführte Abschnitte innerhalb der Prozesskette (wie z. B. die Transporte oder die Holzernte mit dem Harvester und das maschinelle Be- und Entladen bzw. das Beschicken der Verarbeitungsmaschinen) hier nicht eigens gemessen worden waren; sie konnten statt dessen auf den OWAS-Wert 100 festgesetzt werden, da dieser den niedrigsten Wert für den Index nach OWAS darstellt und den sitzenden Tätigkeiten entspricht.

Die Ergebnisse in Tabelle 38 zeigen, dass – kaum überraschend – die Arbeiten der Modellverfahrenskette 4 ("professionelles Scheitholzgewerbe") als am wenigsten belastend anzusehen sind, zumal hier auch die höchste Mechanisierungsstufe vorliegt. Wie in Kapitel 6.2.2 gezeigt, ist hier aber zugleich auch die Arbeitsproduktivität am höchsten, das bedeutet, dass der Scheitholzausstoß je Arbeitskraftstunde (AKh) am größten ist und somit auch die Belastung je produzierter Einheit Scheitholz günstig ist. Letzteres stellt allerdings eine Angabe dar, die sich hier nicht sinnvoll in Form einer Vergleichszahl errechnen lässt. Vielmehr sind die Angaben in Tabelle 38 als eine Arbeitsplatzcharakterisierung zu interpretieren, die unabhängig von der Arbeitsproduktivität optimiert werden sollte.

Die Ergebnisse in Tabelle 38 weisen einen bemerkenswerten – wenn auch geringen – Anstieg der Arbeitsschwere von Pfad 1 (Freizeit-Selbstwerber) zu Pfad 2 (Waldbauer 1, wenig mechanisiert) aus, zumal in Pfad 2 eine höhere Mechanisierung vorliegt. Dies lässt sich durch die Tatsache erklären, dass die eher wenig belastenden Arbeiten am großen Spalter deutlich schneller ablaufen, wodurch sich der prozentuale Anteil der übrigen zum Teil schwereren Arbeiten der Prozesskette erhöht, so dass diese rechnerisch stärker gewichtet werden müssen. Für eine Gesamtbeurteilung der Arbeiten in einer Prozesskette erscheint dieses rechnerische Vorgehen dennoch angemessen, denn aus Sicht der arbeitenden Person ist die Arbeitsweise des Freizeit-Selbstwerbers im Vergleich zum Waldbauern 1 insgesamt vorzuziehen. Aus Sicht des Unternehmers verhält es sich dagegen umgekehrt, weil beim Waldbauern 1 die Produktivität gegenüber dem Freizeit-Selbstwerber erhöht ist (vgl. Tabelle 37).

Tabelle 38: Arbeitsbelastung in den einzelnen Prozessketten (OWAS-Faktor nach Lundqvist)

Verfahrensschritt	Pfad 1 Freizeit-Selbstwerber	Pfad 2 Waldbauer 1, gering mechanisiert	Pfad 3 Waldbauer 2, höher mechanisiert	Pfad 4 Professionelles Scheitholzgewerbe
Holzernte + Rücken (Selbstwerber, 1 m)	186	186	-	-
Holzernte + Rücken Traktor/Seilwinde	-	-	170	-
Holzernte (Jungdurchforstung, Harvester)	-	-	-	100
Holzernte Rücken (Jungdurchforst., Forwarder)	-	-	-	100
Laden (33 cm von Hand, geschüttet, lose)	-	171	-	-
Laden (33 cm maschinell, geschüttet, lose)	-	-	100	100
Laden (1 m ungespalten, von Hand)	171	171	-	-
Laden (mit Kran)	-	-	100	100
Transport (PKW + Anhänger)	100	-	-	-
Transport 1 (Traktor + Anhänger)	-	100	100	-
Transport 2 zum Kunden (Traktor + Anhänger)	-	100	100	-
Transport 1 Verarbeitungsplatz (LKW)	-	-	-	100
Transport 2 zum Kunden (LKW)	-	-	-	100
Abladen 1 (kippen)	100	100	100	100
Abladen 2 Kunde	-	100	-	-
Abladen (Kran)	-	-	100	100
Ablängen Kreissäge (auf 33 cm)	145	145	-	-
Spalter klein	142	-	-	-
Spalter groß	-	142	-	-
Beschicken maschinell (mit Kran)	-	-	100	100
Kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	109	-
Große kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	-	118
Schichten (33 cm gespalten)	171	171	-	-
Nach Zeitanteilen gewichteter Durchschnitt:	161	168	142	106

6.2.4 Spezifischer Energieaufwand in den Prozessketten

Der spezifische Energieaufwand ist die auf die produzierte Holzmenge bezogene Endenergiemenge (Kraftstoff oder Strom). Er wurde in den Praxismessungen für die meisten Verfahrensschritte der Aufbereitung direkt vor Ort bestimmt (vgl. Kapitel. 5.4). Für einige zusätzliche Verfahrensschritte wurde der Energieaufwand – um ihn elektrisch angeben zu können und somit vergleichbar mit den übrigen Teilverfahren der Aufbereitung zu machen – auf Basis von Maschinenkenndaten und den Kennwerten der anderen gemessenen Maschinen, wie der Kreissäge und des Senkrechspalters, berechnet. Dazu wurden die je Zeiteinheit berechneten oder angegebenen Verbräuche in einen spezifischen Energieverbrauchswert im Vergleich zum möglichen Maximalwert umgerechnet. Dieses Vorgehen betrifft im Einzelnen die Teilverfahren für die kombinierten Säge-Spaltmaschinen (vgl. Kapitel 5.4.6).

In Tabelle 39 sind die einzelnen Energieaufwendungen aufgelistet und zu einem Summenwert für die ganze Prozesskette aufaddiert. Demzufolge wendet der Freizeit-Selbstwerber (Pfad 1) für die gesamte Bereitstellung besonders wenig Energie je Festmeter ofenfertiges Scheitholz auf. Sein aggregierter Verbrauchswert liegt mit 8,9 kWh/Fm erwartungsgemäß am niedrigsten, er könnte

durch Verwendung einer Axt anstelle des kleinen Senkrechtspalters sogar noch weiter abgesenkt werden.

Auf Grund der steigenden Transportaufwendungen und des höheren Mechanisierungsgrades steigt der Energieaufwand in den drei übrigen Prozessketten auf 12,5 kWh/Fm (Pfad 2), 22,5 kWh/Fm (Pfad 3) auf 47,4 kWh/Fm (Pfad 4) und liegt damit bei mehr als dem Fünffachen des Freizeit-Selbstwerbers. Die Unterschiede beim Transportenergieaufwand resultieren zusätzlich aus der unterschiedlichen Ladekapazität eines Traktorengespanns im Vergleich zu einem LKW oder einem PKW mit Anhänger.

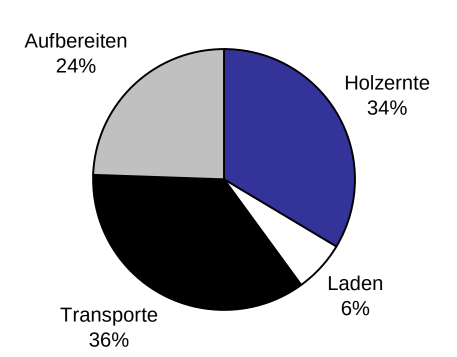
Tabelle 39: Der spezifische Energieaufwand in den einzelnen Prozessketten. Endenergieträger in Klammern: k Kraftstoff, el elektrischer Strom

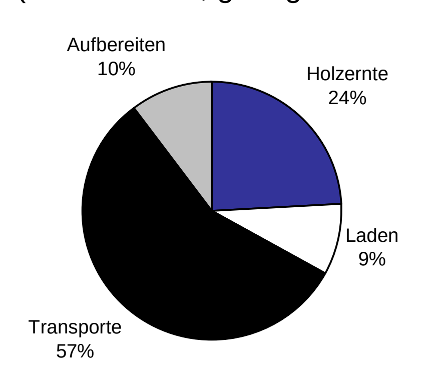
Verfahrensschritt	Pfad 1 Freizeit-Selbstwerber (kWh/Fm)	Pfad 2 Waldbauer 1, gering mechanisiert (kWh/Fm)	Pfad 3 Waldbauer 2, höher mechanisiert (kWh/Fm)	Pfad 4 Professionelles Scheitholzgewerbe (kWh/Fm)
Holzernte + Rücken (Selbstwerber, 1 m)	3,0 *(k)*	3,0 *(k)*	-	-
Holzernte + Rücken Traktor/Seilwinde	-	-	6,3 *(k)*	-
Holzernte (Jungdurchforstung, Harvester)	-	-	-	11,8 *(k)*
Holzernte Rücken (Jungdurchforst., Forwarder)	-	-	-	5,5 *(k)*
Laden (33 cm, von Hand, geschüttet, lose)	-	0,0	-	-
Laden (33 cm, maschinell, geschüttet, lose)	-	-	0,7 *(k)*	0,7 *(k)*
Laden (1 m ungespalten, von Hand)	0,0	0,0	-	-
Laden (mit Kran)	-	-	0,9 *(k)*	0,9 *(k)*
Transport (PKW + Anhänger)	3,2 *(k)*	-	-	-
Transport 1 (Traktor + Anhänger)	-	2,5 *(k)*	2,5 *(k)*	-
Transport 2 zum Kunden (Traktor + Anhänger)	-	4,6 *(k)*	9,2 *(k)*	-
Transport 1 Verarbeitungsplatz (LKW)	-	-	-	3,6 *(k)*
Transport 2 zum Kunden (LKW)	-	-	-	21,0 *(k)*
Abladen 1 (kippen)	0,6 *(k)*	0,6 *(k)*	0,6 *(k)*	0,6 *(k)*
Abladen 2 beim Kunden	-	0,6 *(k)*	-	-
Abladen (Kran)	-	-	0,7 *(k)*	0,7 *(k)*
Ablängen Kreissäge (auf 33 cm)	0,7 *(el)*	0,7 *(el)*	-	-
Spalter klein	1,5 *(el)*	-	-	-
Spalter groß	-	0,6 *(el)*	-	-
Beschicken maschinell (mit Kran)	-	-	0,9 *(k)*	0,9 *(k)*
Kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	0,8 *(el)*	-
Große kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	-	1,7 *(el)*
Schichten (33 cm gespalten)	0,0	0,0	-	-
Summe Energiebedarf (kWh/Fm):	8,9	12,5	22,5	47,4
Verteilung Strombedarf / Kraftstoff (%)	32 / 68	12 / 88	4 / 96	4 / 96

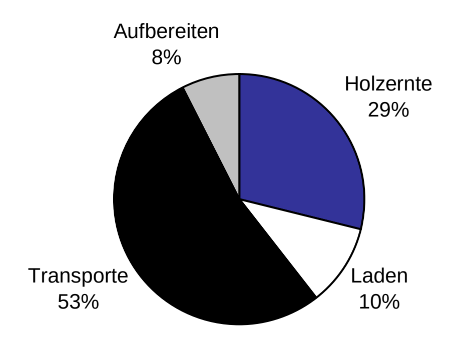
Bei der Betrachtung der Verteilung der in den Prozessketten aufgewendeten Endenergieträger (Tabelle 39) fällt auf, dass der Anteil der elektrischen Energie im Vergleich zu den Kraftstoffen

mit zunehmendem Grad der Mechanisierung von 32 % auf 4 % abnimmt, wohingegen die Summe des Energiebedarfs von 8,9 kWh/Fm bei Pfad 1 auf 47,4 kWh/Fm bei Pfad 4 steigt. Beides ist unter anderem die Folge des zunehmenden Transportaufwandes, wobei bei Pfad 4 noch die Energiekosten für den Einsatz eines Harvesters und Forwarders bei der Holzernte ins Gewicht fallen.

Eine Auswertung des anteiligen Energieverbrauchs in den einzelnen Phasen der Prozesskette zeigt, dass der Anteil für das eigentliche Aufbereiten von Pfad 1 mit 24 % bei bis zu Pfad 4 auf nur noch 5 % überraschend deutlich absinkt (Abbildung 117). Bei allen Verfahren haben verursachen die Transporte den größten Energieverbrauchsanteil, hier liegen damit auch die größten Einsparpotentiale.







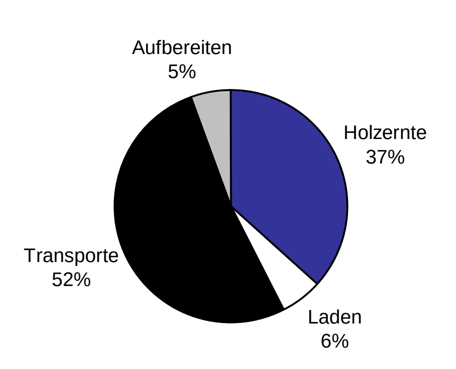


Abbildung 117: Endenergieverbrauchsanteile verschiedener Phasen der Scheitholzbereitstellung, dargestellt für die vier ausgewählten Modellverfahrensketten. Holzernte: Holzernte und Rücken. Transporte: Hin- und Zurück Wald-Bearbeitungsplatz-Kunde. Laden: Be-und Entladen und Aufschichten des Holzes. Aufbereiten: Ablängen, Spalten, Beschicken

Die hohen Anteile der Transportenergie am Endenergieverbrauch weisen auch darauf hin, dass die Bereitstellungskette für Scheitholz insgesamt einen energetisch relativ extensiven Prozess darstellt, zumal – im Vergleich zur Holzhackschnitzel- oder Pelletbereitstellung – nur ein geringer Zerkleinerungsgrad notwenig ist und auch eine energieintensive Trocknung oder Kühlung sowie die mechanische Förderung hier weitgehend entfallen. Dies wird besonders deutlich wenn man die Summe der Endenergieaufwendungen aus Tabelle 39 ins Verhältnis zur Energiemenge in ei-

nem Festmeter Scheitholz setzt. Je Festmeter lufttrockenem Buchenholz sind hier ca. 3040 kWh anzusetzen, bei Fichtenholz wären es ca. 1833 kWh. Somit errechnet sich beispielsweise Buchenholz in Pfad 1 ein Input-Outputverhältnis der Endenergieträger von 0,0029 (Tabelle 40). Das heißt, dass nur ca. 0,3 % der Scheitholzenergiemenge als Endenergieträger investiert werden muss. Beim energieintensiveren Pfad 4 sind es dagegen ca. 1,6 % (Buche) bzw. ca. 2,6 % (Fichte) des Energieertrags, der in Form von Endenergieträgern aufgewendet werden muss.

Um eine energiewirtschaftliche Vergleichbarkeit des Energieverbrauchs zu erreichen, muss der Strom- und Kraftstoffverbrauch mit Hilfe eines Faktors für den kumulierten Energieverbrauch (KEV) verrechnet werden. Für den Kraftwerksmix in Deutschland gilt hier der Faktor 2,9 [44], das bedeutet, dass je Kilowattstunde Strom, die beim Endverbraucher eingesetzt wird, in der Vorkette bereits 2,9 kWh Primärenergie für die Gewinnung und Verteilung (inkl. Leitungsverluste) aufgewendet wurden. Für Dieselkraftstoff wird ein entsprechender Primärenergiefaktor von 1,15 angegeben [44].

Tabelle 40 zeigt das Ergebnis der Berechnungen, bei denen diese primärenergetischen Faktoren berücksichtigt wurden, wobei hier vereinfachend die maschinengebundenen Energieaufwendungen sowie die für die Herstellung der Betriebsstoffe (z. B. Hydrauliköl, Sägekettenöl) benötigte Primärenergie vernachlässigt wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass auch unter energiewirtschaftlichen Berechnungsannahmen von einer besonders günstigen Energiebilanz bei der Scheitholzbereitstellung auszugehen ist, da der Primärenergieaufwand bei nur 0,5 bis 3,2 % der bereitgestellten Scheitholzenergie liegt. Damit zählt die Scheitholzproduktion unter den Bereitstellungsverfahren für Bioenergieträger zu den Prozessketten mit besonders niedrigen spezifischen Energieaufwendungen (vgl. [43]).

Tabelle 40: Energiebilanz der Scheitholzbereitstellung. Hier nur Berechnungen für den Energieverbrauch in der Prozesskette (ohne Maschinenherstellung und Betriebsstoffe)

	Energiebedarf der Prozesskette (vgl. Tabelle 39)		Bilanz Input/Output, endenergiebezogen		Bilanz Input/Output primärenergiebezogen[a]	
	Endenergie kWh/Fm	davon Strom/ Kraftstoff (%)	Buche[b]	Fichte[b]	Buche[b]	Fichte[b]
Pfad 1	8,9	32 / 68	0,0029	0,0049	0,0050	0,0083
Pfad 2	12	12 / 88	0,0039	0,0065	0,0054	0,0089
Pfad 3	22,5	4 / 96	0,0074	0,0123	0,0090	0,0150
Pfad 4	47,4	4 / 96	0,0156	0,0259	0,0190	0,0315

[a] Primärenergiefaktoren: elektrischer Strom 2,9; Kraftstoffe (einheitlich für Diesel und Benzin): 1,15 (d.h. kWh Primärenergieaufwand je kWh Strom- bzw. Kraftstoffverbrauch)

[b] Energiemenge je Festmeter Scheitholz bei 15 % Wassergehalt: Buche 3040 kWh, Fichte 1833 kWh

6.2.5 Bereitstellungskosten in den Prozessketten

Die Gesamtkosten der Scheitholzbereitstellung werden hier für die vier Prozessketten jeweils aus den drei Kostengruppen "Maschinenkosten", "Energiekosten" und "Lohnkosten" berechnet. Das Vorgehen und die Ergebnisse hierzu werden nachfolgend vorgestellt.

6.2.5.1 Maschinenkostenberechnung

Generelles Vorgehen. Um eine annähernde Vergleichbarkeit der Maschinenkosten zu gewährleisten, sind – soweit dies geboten erscheint – möglichst einheitliche Basisdaten und Grundannahmen zu treffen. Daher ist die direkte Übernahme von Kostenangaben aus der Literatur oftmals nicht ohne Weiteres möglich, sondern bedarf gegebenenfalls einer weiteren Anpassungsrechnung, durch welche beispielsweise ein einheitliches Zinsniveau oder ein einheitliches Kostenrechnungsverfahren sichergestellt werden. Auch im vorliegenden Fall konnte meist nicht auf Standardsätze zurückgegriffen werden, so dass zum Teil eigene Berechnungen angestellt werden mussten, zumal vereinzelte Kostenangaben in anderen Quellen nicht mit den hier getroffenen Basisannahmen vergleichbar waren. Im Einzelnen wurden daher spezielle Kostenrechnungen für den kleinen und großen Senkrechtspalter, die kombinierte Säge-Spaltmaschine, die Kreissäge und die Motorsäge durchgeführt.

Investitionskostenrechnung. Die Berechnung der Investitionskosten erfolgt nach der Annuitätenmethode, mit der die am Anfang der Lebensdauer stehenden Investitionen auf die einzelnen Jahre der Nutzungsdauer umgelegt werden. Dies erfolgt durch Multiplikation der Investitionssumme mit dem Annuitätenfakor *a*, der sich aus nachfolgenden Gleichung ergibt, wobei *i* der kalkulatorische Zinssatz und *T* die kalkulatorische Betrachtungsdauer darstellen.

$$a = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1}$$

Der errechnete periodisch konstante Betrag wird als Annuität bezeichnet, der als Zins und Tilgung für rückzuzahlendes Kapital in Höhe des Kapitalwertes aufzufassen ist. Diese Berechnungsmethode ermöglicht es, alle Zahlungen nach der Ermittlung der jeweiligen Annuität aufzusummieren, um damit die durchschnittlichen jährlichen Kosten zu ermitteln.

Einheitlich wird hier ein Zinsfuß von 6 % unterstellt. Dieser Zinsfuß berücksichtigt einen hohen Anteil Fremdkapital bei der Finanzierung der jeweiligen Investitionsgüter und liegt daher deutlich über dem durchschnittlichen Betrag der jährlichen Preissteigerungsrate. Bei der Kalkulation wurden die in Tabelle 41 genannten Annahmen und Verrechnungspauschalen angewendet.

Reparaturkosten. Nach einer beim KTBL üblichen Methode [37] werden die Reparaturkosten ermittelt. Dabei wird zunächst die Reparaturkostensumme (R_t) über die gesamte Lebensdauer bestimmt. In den vorliegenden Berechnungen werden einheitlich 80 % des Anschaffungspreises unterstellt. Dieser Wert nimmt eine Zwischenstellung zwischen landwirtschaftlichen Maschinen (z. B. 6-reihiger Zuckerrüben-Vollernter mit 63 %, vgl.[55]) und forstlichen Maschinen z. B. kombinierte Säge-Spaltmaschine Kretzer Herkules II mit 100 % [41] ein. Die jährlichen Reparaturkosten (R_a) errechnen sich dann nach der Formel

$$R_a = R_t / n^{1,5} \times L^{1,5} / N_{kalk}$$

wobei *n* die zugrunde gelegte Lebensdauer in Stunden darstellt, *L* ist die für den Praxisfall erwartete Gesamtnutzungsdauer in Stunden und N_{kalk} ist die Nutzungsdauer in Jahren, wobei diese Nutzungsdauer sich bei hoher Auslastung verkürzen kann. Durch den Exponent 1,5 wird sichergestellt, dass die Reparaturkosten mit zunehmender Benutzung ansteigen. Bei der Verwendung

der o.g. Berechnungsformel bleiben die Reparaturkosten mit der Veränderung der jährlichen Auslastung variabel, das heißt, sie sinken, wenn die tatsächliche Lebensdauer unterhalb von *L* liegt.

Weitere Kostenansätze. Neben den Investitions- und Reparaturkosten wurden weitere pauschale Kostenansätze für Maschinenunterbringung, Versicherung, Geschäftskosten sowie Betriebssteuern und -lasten festgelegt, sie entsprechen den bei Maschinenkostenberechnungen allgemein üblich Annahmen (vgl. z. B. [55]). Kosten für den Arbeitsaufwand der Maschinenwartung werden hier vereinfachend nicht in Anrechnung gebracht. Die pauschalen Annahmen für die Berechnungen sind in Tabelle 41 zusammengestellt.

Für den Schmierstoff- und Hydraulikölverbrauch wurde bei den Spaltern bzw. Sägespaltmaschinen ein pauschaler Ansatz von 20 % der Stromkosten angenommen. Bei der Motorsäge liegt die Annahme für den Verbrauch an Verlustschmierstoff (Kettenöl) bei 1,3 Liter je Maschinenarbeitsstunde. Energie- und Lohnkosten werden hier nicht angesetzt sondern kommen in separaten Berechnungen zum Ansatz (vgl. Kapitel 6.2.5.2 und 6.2.5.3).

Tabelle 41: Berechnung der Maschinenkosten ohne Energiekosten und Lohnanspruch (durch Auf- oder Abrundung der Einzelwerte sind minimale Abweichungen bei der Summenbildung möglich)

Annahme / Kostenposition	Senkrecht-spalter, klein	Senkrecht-spalter, groß	kleine kombinierte Sägespalt-maschine	große kombinierte Sägespalt-maschine	Motorsäge	Kreissäge
Variable Einflussgrößen						
Anschaffungspreis A (inkl. MwSt.)	2.000	3.500	9.500	150.000	700	1.000
Nutzungsdauer nach Jahren (a)	10	10	10	10	6	10
Nutzungsdauer nach Stunden (Abschreibungsschwelle) (h)	10.000	10.000	10.000	10.000	5.000	1.0000
Jahresauslastung (h)	350	350	500	1000	400	350
Lebensdauer bei o.g. Auslastung (a)	28,6	28,6	20,0	10,0	12,5	28,6
hier unterstellte Lebensdauer (a)	10	10	10	10	6	10
Reparaturkostensumme für ges. Nutzungsdauer (% von A)	80	80	80	80	80	80
Kosten für Unterbringung (% von A)	0,5	0,5	0,5	0,5	–	0,5
jährl. Versicherungskosten (% von A)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
jährl. Geschäftskosten (% v. A)	3	3	3	3	3	3
jährl. Betriebssteuer u. Lasten (% v. A)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Kostenzusammenstellung (€/a):						
Annuität (Anschaffung pro Jahr)	272	476	1291	20.380	95	136
Kosten der Unterbringung	10	18	48	750	0	5
Versicherung	10	18	48	750	3,5	5
allgemeine Geschäftskosten	60	105	285	4500	21	30
Betriebssteuern und Lasten	10	18	48	750	4	5
Summe jährliche Festkosten/a	362	633	1718	27.130	123	181
Reparaturkosten	33	58	269	12.000	31	17
Schmierstoff/Hydraulikölkosten	8	12	38	400	52	0
Summe jährliche variable Kosten	*41*	*70*	*306*	*12.400*	*91*	*17*
Gesamtmaschinenkosten (€/a)	403	703	2.024	39.530	214	197
Gesamtmaschinenkosten (€/h)	1,15	2,01	4,05	39,53	0,54	0,56

6.2.5.2 Spezifische Energiekosten der Prozessketten

Die Daten zum spezifischen Energiebedarf wurden mit Energieträgerpreisen von 0,20 €/kWh (Strom) bzw. 1,05 €/l (Dieselkraftstoff) verrechnet und ergeben so die spezifischen Energiekosten, die in Tabelle 42 für die relevanten Verfahrensschritte der jeweiligen Prozesskette zusammengestellt sind. Für Motorsägen wurden Kraftstoffkosten von 1,40 € angesetzt. Dieser Preis ergibt sich aus den Kosten für Benzin (1,25 €/l) und Gemischöl 5,80 €/l (Mischung: 1:40).

Die Kostensumme für den Pfad 1 weist demnach einen Energiekostenbetrag von 1,25 € je Festmeter aus. Bei den Pfaden 2 bis 4 steigen diese Kosten auf Werte zwischen 1,53 €/Fm (Pfad 2) und 2,44 €/Fm (Pfad 3). In Relation zu den Gesamtkosten (vgl. Tabelle 43) liegen die spezifischen Energiekosten somit bei lediglich 1,8 % für Pfad 1. Sie steigen auf 2,8 % für Pfad 2 bzw. auf

7,1 % für Pfad 3 und 13,5 % für Pfad 4. Das bedeutet, dass die spezifischen Energiekosten mit zunehmender Rationalisierung wegen der insgesamt sinkenden spezifischen Gesamtkosten (Tabelle 43) und den steigenden Transportentfernungen einen zunehmenden Kostenfaktor darstellen.

Allerdings sind die Gesamtenergiekosten auch von den im Einzelnen aufgewendeten Energieträgern abhängig, deren Anteile in Kapitel 6.2.4 (Tabelle 39) zusammengestellt sind. In Kapitel 5.4.4 wird dargestellt, dass der Energieverbrauch (und damit auch die Energiekosten) in der Regel deutlich sinken, sobald anstelle von Kraftstoffen elektrischer Strom eingesetzt werden kann.

Tabelle 42: Spezifische Energiekosten (€/Fm) der Prozessketten

Verfahrensschritt	Pfad 1 Freizeit-Selbstwerber (€/Fm)	Pfad 2 Waldbauer 1, gering mechanisiert (€/Fm)	Pfad 3 Waldbauer 2, höher mechanisiert (€/Fm)	Pfad 4 Professionelles Scheitholzgewerbe (€/Fm)
Holzernte + Rücken (Selbstwerber, 1 m)	0,42	0,42	-	-
Holzernte + Rücken Traktor/Seilwinde	-	-	0,67	-
Holzernte (Jungdurchforstung, Harvester)	-	-	-	1,24
Holzernte Rücken (Jungdurchforst., Forwarder)	-	-	-	0,58
Laden (33 cm von Hand geschüttet lose)	-	0,00	-	-
Laden (33 cm maschinell geschüttet lose)	-	-	0,07	0,07
Laden (1 m ungespalten von Hand)	0,00	0,00	-	-
Laden (mit Kran)	-	-	0,10	0,10
Transport (PKW + Anhänger)	0,33	-	-	-
Transport 1 (Traktor + Anhänger)	-	0,26	0,26	-
Transport 2 zum Kunden (Traktor+Anhänger)	-	0,48	0,97	-
Transport 1 Verarbeitungsplatz (LKW)	-	-	-	0,38
Transport 2 zum Kunden (LKW)	-	-	-	2,21
Abladen 1 (kippen)	0,06	0,06	0,06	0,06
Abladen 2 beim Kunden	-	0,06	-	-
Abladen (Kran)	-	-	0,07	0,07
Ablängen Kreissäge (auf 33 cm)	0,14	0,14	-	-
Spalter klein	0,30	-	-	-
Spalter groß	-	0,12	-	-
Beschicken maschinell (mit Kran)	-	-	0,10	0,10
Kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	0,15	-
Große kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	-	0,33
Schichten (33 cm gespalten)	0,00	0,00	-	-
Summe Energiekosten (€/Fm):	1,25	1,53	2,44	5,14

6.2.5.3 Gesamtkosten in den Prozessketten

Bei Gesamtkosten werden die Ergebnisse aus den Maschinenkostenberechnungen (Kapitel 6.2.5.1), den spezifischen Energiekostenberechnungen (Kapitel 6.2.5.2) sowie zu den Arbeitszeitaufwendungen (Kapitel 6.2.2) zusammengeführt. Zusätzlich sind weitere Kostenannahmen zu

treffen. Bei den Maschinen und Geräten, zu denen keine eigenen Berechungen durchgeführt worden waren, wurde auf weitere Datenquellen zurückgegriffen. Aus den Empfehlungen des Kuratoriums Bayerischer Maschinen- und Betriebshilfsringe (KBM) wurden die Stundensätze für einen Traktor als Zugmaschine (9 €/h für 54 kW Allrad, ohne Kraftstoff) bzw. nur für stationäre Antriebszwecke (6 €/h, ohne Kraftstoff) entnommen. Ebenfalls gelten die KBM-Sätze für 8-t-Transportanhänger (4 €/h), eine Seilwinde (5 €/h) und einen Radlader (29 €/h). Für die Kosten des Harvester- und Forwardereinsatzes wurde auf Daten von PAUSCH [46] zurückgegriffen, wobei darin die meist deutlich höheren Lohnkosten für dieses Teilverfahren bereits enthalten sind. Bei den Transporten wird bei Traktorgespannen nach Zeit abgerechnet, während für PKW-Transporte ein entfernungsabhängiger Kostensatz von 0,30 € je gefahrenem Kilometer berechnet wird und nur der PKW-Anhänger mit 6 €/h in die Berechnung eingeht. LKW-Transporte werden dagegen mit einem Stundensatz von 45 €/h verrechnet, wobei zusätzlich ein Kilometerzuschlag von 0,75 €/km angesetzt wird (in Anlehnung an [11]). Alle Rückfahrten gehen als Leerfahrt mit dem vollen Kostenansatz in die Berechnung ein.

Bei den Lohnkosten wurde ein Ansatz von 15,24 €/h für die Bedienung der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine und für den Fahrer eines LKW gewählt, ansonsten gehen die Lohnkosten für Arbeiter oder Traktorfahrer mit 11,46 €/h in die Bewertung ein, dieser Wert entspricht dem Standardsatz des KTBL [17]. Der Arbeitszeitbedarf in diesen beiden Lohngruppen richtet sich nach dem in Kapitel 6.2.2 (Tabelle 37) aufgelisteten spezifischen Zeitbedarf je Festmeter Scheitholz für die jeweiligen Teilverfahrensschritte der Prozesskette.

Die aggregierten Gesamtkosten der hier definierten Prozesskettenmodelle sind in Tabelle 43 dargestellt. Sie liegen bei ca. 70,66 €/Fm für die Scheitholzbereitstellung in Pfad 1 („Freizeit-Selbstwerber“) und reduzieren sich bei Pfad 3 auf 34,18 €/Fm, während sie bei Pfad 4 wieder leicht auf 38,15 €/Fm ansteigen. Die Kostenreduzierung bei Pfad 3 und Pfad 4 ist allerdings nur möglich, wenn eine für die jeweiligen Investitionen angemessene Auslastung der Maschinen erreicht wird. Beispielsweise wird für die große kombinierte Säge-Spaltmaschine ein jährlicher Einsatz von 1000 Stunden bei einer Nutzungsdauer von 10 Jahren angesetzt (vgl. Tabelle 41).

Auch bei den beiden Prozessketten des Waldbauers (Pfad 2 und 3) kommt es zu einer Kostenreduzierung gegenüber dem Selbstwerber. Hier schlagen sich vor allem die deutlichen Kostensenkungen für den Wechsel vom kleinen zum großen Senkrechtspalter nieder, dieser weist eine höhere Verarbeitungsleistung, auf was zu entsprechenden Lohnkosteneinsparungen führt (vgl. hierzu auch Tabelle 37 in Kapitel 6.2.3). Mit der höheren Mechanisierung in Pfad 3 ergeben sich weitere deutliche spezifische Kostensenkungen, die vor allem auf die Leistungssteigerung bei der Holzernte und beim Laden sowie auf das verzichtbare Ablängen durch den Wechsel auf die kleine kombinierte Sägespaltmaschine zurückzuführen sind (Tabelle 43). Allerdings wurde bei den Maschinenkosten hier ebenfalls eine höhere Auslastung unterstellt, so dass auch zwischen Pfad 2 und Pfad 3 eine Steigerung des Gesamtaufkommens vorausgesetzt wird. Generell sind die vier Pfade somit nicht als Verfahrensalternativen, sondern als nebeneinander existierende Produktionsketten mit unterschiedlichen Einsatzoptima zu interpretieren, zumal auch die Gesamtjahresproduktion aufgrund der angenommenen Auslastung für die Aufbereitungsmaschinen zwischen 97 Rm und 3511 Rm schwankt (vgl. Kapitel 6.2). Somit sind für einen Wechsel unter den verschiedenen Pfaden neben der Investition in andere Maschinen und Veränderungen des Produktionsablaufes auch neue Vertriebswege und Absatzmöglichkeiten erforderlich.

Tabelle 43: Spezifische Gesamtkosten der Scheitholzbereitstellung in den einzelnen Prozessketten (€/Fm). Angaben inkl. Energie- und Lohnkosten

Verfahrensschritt	Pfad 1 Freizeit-Selbstwerber (€/Fm)	Pfad 2 Waldbauer 1, gering mechanisiert (€/Fm)	Pfad 3 Waldbauer 2, höher mechanisiert (€/Fm)	Pfad 4 Professionelles Scheitholzgewerbe (€/Fm)
Holzernte + Rücken (Selbstwerber, 1 m)	21,84	21,84	-	-
Holzernte + Rücken Traktor/Seilwinde	-	-	19,30	-
Holzernte (Jungdurchforstung, Harvester)	-	-	-	11,74
Holzernte Rücken (Jungdurchforst., Forwarder)	-	-	-	6,87
Laden (33 cm von Hand geschüttet lose)	-	1,72	-	-
Laden (33 cm maschinell geschüttet lose)	-	-	0,38	-
Laden (1 m ungespalten von Hand)	3,47	3,47	-	-
Laden (mit Kran)	-	-	0,65	0,65
Transport (PKW + Anhänger)	0,56	-	-	-
Transport 1 (Traktor + Anhänger)	-	1,28	1,28	-
Transport 2 Kunde (Traktor + Anhänger)	-	2,39	4,79	-
Transport 1 Verarbeitungsplatz (LKW)	-	-	-	0,98
Transport 2 Kunde (LKW)	-	-	-	6,64
Abladen 1 (Kippen)	0,32	0,32	0,32	0,32
Abladen 2 beim Kunden	-	0,32	-	-
Abladen (Kran)	-	-	0,47	0,47
Ablängen Kreissäge (auf 33 cm)	7,65	7,65	-	-
Spalter klein	29,62	-	-	-
Spalter groß	-	9,10	-	-
Beschicken maschinell (mit Kran)	-	-	0,65	0,65
Kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	6,35	-
Große kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	-	9,46
Schichten (33 cm gespalten)	7,21	7,21	-	-
Summe Gesamtkosten, ohne Rohholzkauf (€/Fm):	70,66	55,29	34,18	38,15
Zum Vergleich: Kosten in €/Rm für 33 cm Scheite, gestapelt)[a]				
Summe Gesamtkosten, ohne Rohholzkauf (€/Rm):	44,52	34,38	21,53	24,04
Zuschlag für Rohholzkauf (€/Rm):	10	10	10	10
Summe Gesamtkosten, mit Rohholzkauf (€/Rm):	54,52	44,38	31,53	34,04

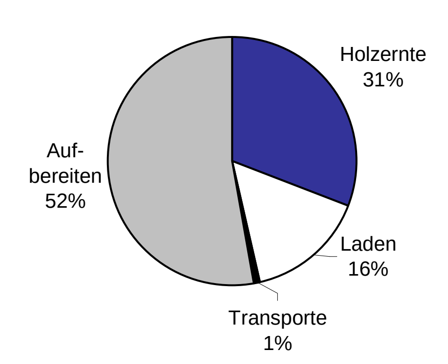
[a] Zu den verwendeten Faktoren für die Umrechnung von Festmeter zu 33-er Scheiten siehe Kapitel 5.6.1. Für Kostenangaben, die sich auf gespaltenes Meterholz beziehen sollen, sind Abschläge gemäß der Umrechnungsfaktoren erforderlich.

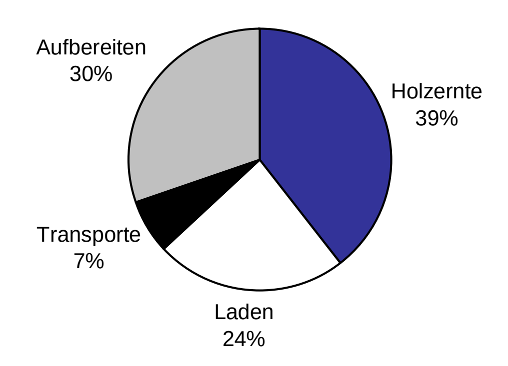
Für das vom Selbstwerber geerntete Holz wird, wenn der Wald nicht in Eigenbesitz ist, normalerweise auch ein (relativ geringer) Preis vom Waldbesitzer (Privat-, Kommunal- oder Staatswald) in Rechnung gestellt. Dieser Betrag liegt bei Selbstwerbern, die bei der Durchforstung meist Schwachholz aufbereiten, derzeit meist in der Größenordnung von 5 bis 15 €/Rm (ungespaltenes Meterscheitholz). Für die zusätzliche Berechnung der Gesamtkostensumme in Tabelle 43 wurde dieser Wert als Kostenzuschlag in allen Modellprozessketten aus Gründen der Vergleichbarkeit einheitlich mit 10 €/Rm (Meterholz Rundlinge) angesetzt, wobei auf eine Preisumrechung für

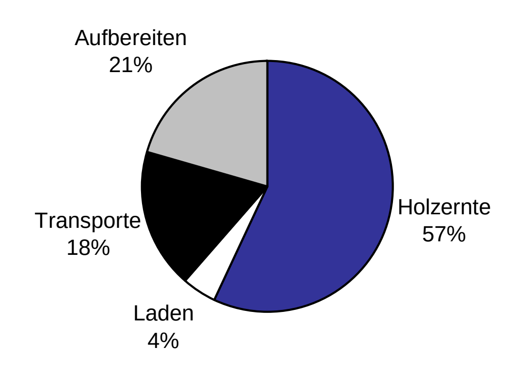
gestapelte Kurzscheite (33 cm) wegen der nur geringfügige Raumbedarfsunterschiede (vgl. Kapitel 5.6.1) verzichtet wird.

Bei den höher mechanisierten Verfahren (Pfad 3 und 4) ist jedoch dieser einheitliche Rohholzpreisansatz weniger sinnvoll, da hier anstelle einer Beerntung in Eigenregie meist ein direkter Ankauf fertig aufbereiteter Industrieholzsortimente für die Weiterverarbeitung erfolgt. Hier wird daher ein Ankaufspreis für das Rohholz von 24 € je Festmeter (Fixlängen) zuzüglich Laden und Transport angesetzt. Bezogen auf den Raummeter (Meterholz Rundlinge) ergibt sich somit ein Rohholzpreis von ca. 13 €/Rm. Für diese Berechnungsvariante liegen die Gesamtkosten mit Rohholzankauf dann bei 19,33 €/Rm (Pfad 3) bzw. 26,12 €/Rm (Pfad 4); sie unterscheidet sich somit nur um ca. ±2 €/Rm von den in Tabelle 43 dargestellten Modellkosten ohne Rohholzankauf in Pfad 3 und 4.

Bei der Betrachtung der Kostenanteile, die in Abbildung 118 für die einzelnen Phasen der Bereitstellungskette errechnet wurden, fällt auf, dass die Lohnkosten bei zunehmender Rationalisierung durch die Maschinenkosten ersetzt werden. Größere Einsparpotentiale finden sich dann nur noch bei der Holzernte, die aber oft durch Zukauf von Industrieholz wegfällt und beim Transport zum Kunden.







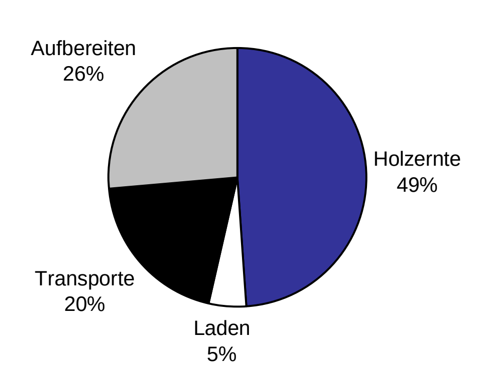
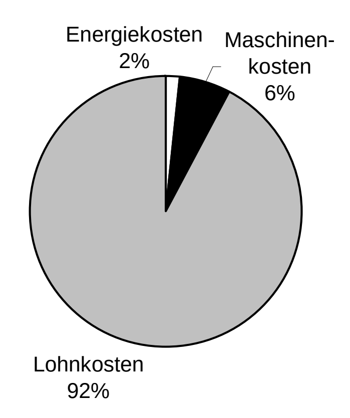
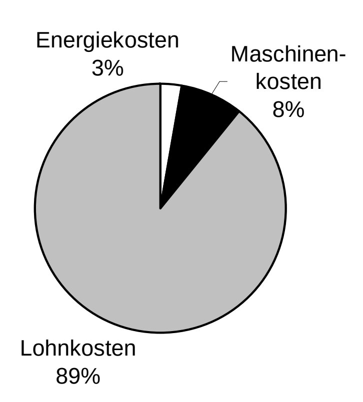
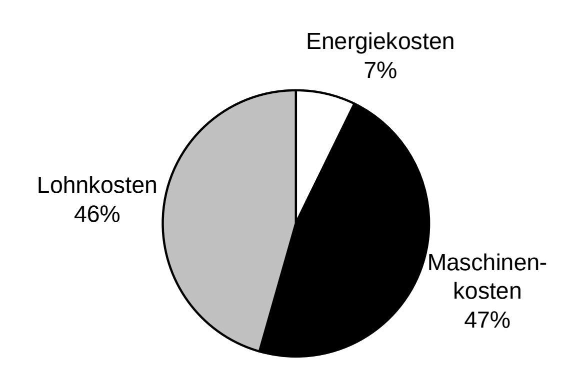


Abbildung 118: Kostenanteile verschiedener Phasen der Scheitholzbereitstellung, dargestellt für die vier ausgewählten Modellverfahrensketten. Holzernte: Holzernte und Rücken. Transporte: Hin- und Zurück Wald-Bearbeitungsplatz-Kunde. Laden: Be-und Entladen und Aufschichten des Holzes. Aufbereiten: Ablängen, Spalten, Beschicken

Eine Zuordnung auf die drei Kostengruppen Maschinenkosten, Lohn- und Energiekosten zeigt Abbildung 119. Hier fällt auf, dass mit zunehmender Mechanisierung der Anteil der Lohnkosten zugunsten des Anteils der Maschinenkosten geringer wird. Die Energiekosten erhöhen sich von 2 % auf 16 % am Anteil der Bereitstellungskosten. Dies liegt neben dem gesteigerten Energiebedarf der einzelnen Maschinen auch am gesteigerten Transportaufkommen.







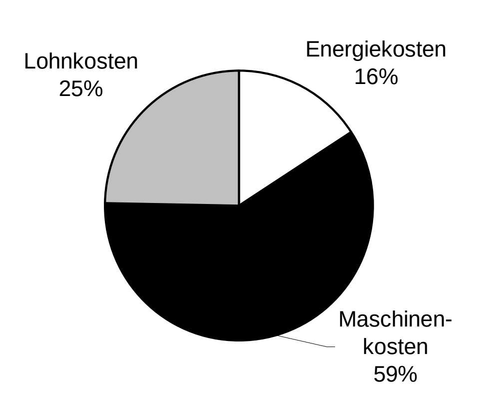


Abbildung 119: Zuordnung der Bereitstellungskosten in den Modellverfahrensketten nach Kostengruppen
** bei Pfad 4 ohne Holzerntekosten (Variante Holzzukauf)*

Vielfach sind in der Praxis abweichende Berechnungsannahmen erforderlich. Für einen Selbstwerber, beispielsweise, der nur eine geringe Brennholzmenge benötigt, ist eine Anrechnung von Lohnkosten oft dann nicht sinnvoll, wenn dieser die Waldarbeit als Bewegungsausgleich für eine sitzende Tätigkeit auffasst. In diesem Fall sinken die Gesamtkosten von 44,52 €/Raummeter (33-er Scheite, ohne Rohholzkauf) relativ deutlich auf 3,52 €/Rm, da die Bereitstellung im Pfad 1 sehr arbeitsintensiv ist. Wenn für das Rohholz noch üblicherweise 10 €/Rm zusätzlich an den Waldeigentümer zu vergüten sind, liegen die Gesamtkosten bei 54,52 €/Rm (mit Lohnansatz) bzw. 13,52 €/Rm (ohne Lohnansatz) für das 33-er Kurzscheitsortiment.

6.2.6 Prozesskettenvergleich

Die in den vorangegangenen Kapiteln aggregierten Prozesskenndaten sind in Tabelle 44 und Abbildung 120 vergleichend zusammengestellt, wobei wegen der zunehmenden Bedeutung zusätzlich auch die Kosten je Schüttraummeter ofenfertiges Scheitholz ausgewiesen sind. Wie erwartet steigen mit zunehmender Mechanisierung der Energiebedarf und damit auch die Energiekosten an, wohingegen sich der Zeitbedarf verringert. Die Gesamtkosten zeigen aber auch, dass

kostendeckend gearbeitet wird, wenn die Scheitholzverkaufspreise, die in Kapitel 7 ermittelt wurden, erzielt werden. Selbst der Freizeit-Selbstwerber würde bei Verkauf seines Brennholzes noch inklusive des Lohnanspruchs für diesen sehr arbeitsintensiven Pfad einen Gewinn erzielen können. Das gilt umso mehr, da die Lohnkosten, die hier mit 11,46 €/h (außer Maschinenführer: 15,24 €/h) inklusive der Lohnnebenkosten angesetzt wurden, in der Praxis oft unterboten werden, zumal hierfür oft nicht oder nur gering qualifiziertes Personal (z. B. Saisonarbeiter) aus dem In- und Ausland zu besonders niedrigen Löhnen eingesetzt werden.

Trotz höheren Absatzes (vgl. 6.2) steigen die Gesamtkosten für das professionelle Scheitholzgewerbe (Pfad 4) im Vergleich zum höher mechanisierten Waldbauern (Pfad 3). Einen Umstieg dieses professionellen Scheitholzgewerbes auf einen niedrigeren Mechanisierungsgrad ist aber aufgrund der erforderlichen Leistungsfähigkeit, der Möglichkeit auch stärkeres Rundholz zu verarbeiten und wegen dem erforderlichen gesteigerten Logistikaufwand nur schwer möglich.

Tabelle 44: Gesamtvergleich aller Bewertungsmerkmale für die vier definierten Modell-Prozessketten der Scheitholzbereitstellung

Bewertungsmerkmal	Pfad 1 Freizeit-Selbstwerber	Pfad 2 Waldbauer 1, gering mechanisiert	Pfad 3 Waldbauer 2, höher mechanisiert	Pfad 4 Professionelles Scheitholzgewerbe
Arbeitsschwere (Index):	161	168	142	106
Zeitbedarf (h/Fm):	5,70	4,24	1,27	0,49
Energiebedarf (kWh/Fm):	8,9	12,5	22,5	47,4
Energiekosten (€/Fm):	1,20	1,48	2,44	5,14
Gesamtkosten (€/Fm):	70,66	55,29	34,18	38,15
Gesamtkosten (€/Rm)[a]:	*44,52*	*34,83*	*21,53*	*24,04*
Gesamtkosten (€/SRm)[b]:	*28,97*	*22,67*	*14,01*	*15,64*

[a] bezogen auf 33 cm Scheite, gespalten und geschichtet
[b] bezogen auf 33 cm Scheite, gespalten und geschüttet

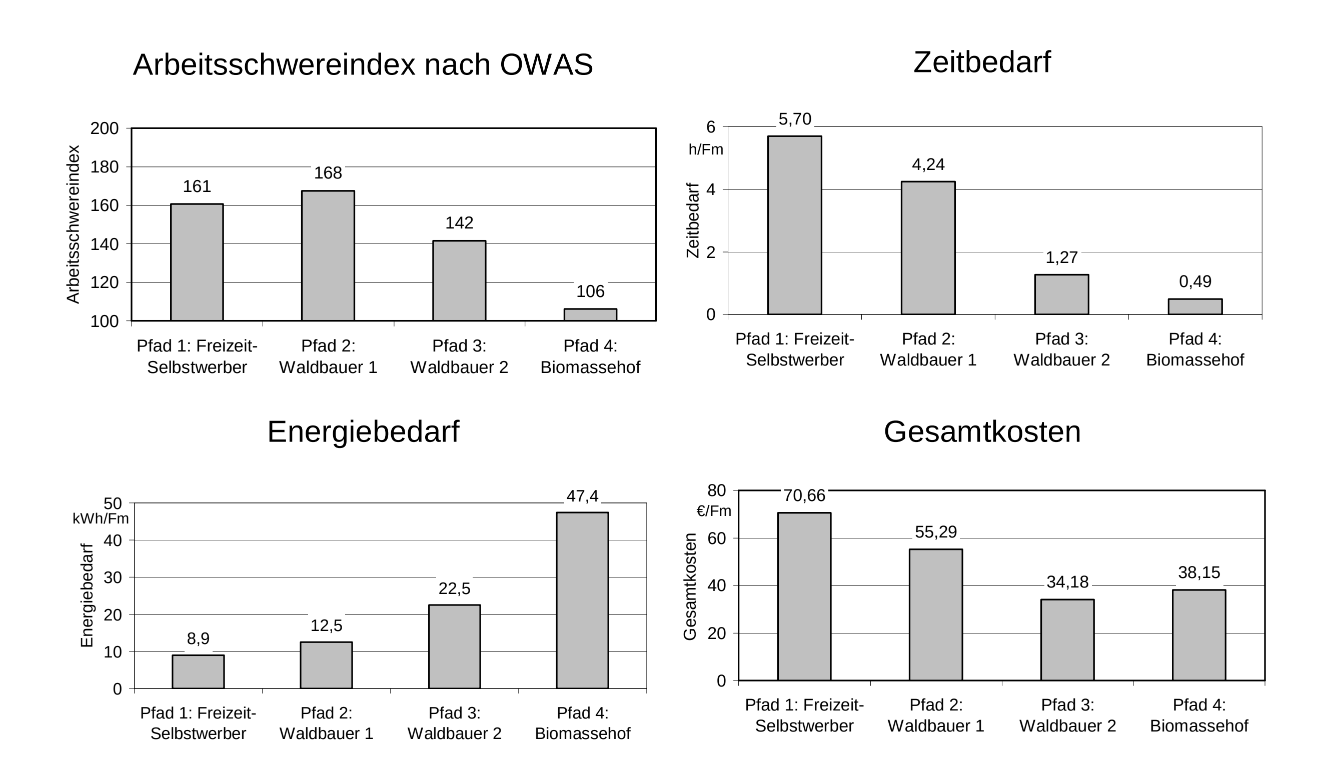


Abbildung 120: Zusammenstellung der Bewertungskenngrößen für die einzelnen Modelverfahrensketten, hier bezogen auf je einen Raummeter 33-er Scheite, gestapelt (außer OWAS: dimensionslos, Beginn bei 100, da niedrigster Wert des OWAS-Indexes). Zur Umrechnung auf andere Volumenmaße und Sortimente siehe Kapitel 5.6.1

7 Erhebung zum Verkaufspreis von Scheitholz

Neben den fossilen Energieträgern werden auch bei einigen Biomassebrennstoffen bereits regelmäßige Preisfeststellungen gemacht, das gilt beispielsweise für Holzpellets und Holzhackschnitzel, deren Preisverläufe regelmäßig publiziert werden (vgl. C.A.R.M.E..N. e.V. [12]). Beim Scheitholz jedoch sind die Preise bislang nicht systematisch und wiederkehrend erfasst worden. Lediglich in einer für Bayern repräsentativen Marktstudie wurden die Endverbraucherpreise für unterschiedliche Scheitholzsortimente einmalig im Jahr 1997 von HARTMANN UND MADEKER [26] festgestellt.

Um diese Lücke zu schließen, wird am TFZ seit dem Jahr 2001 eine regelmäßige Preisfeststellung für verschiedene Scheitholzsortimente durchgeführt. Hierbei handelt es sich um eine Aktivität, die im Zuge des hier vorliegenden Forschungsprojektes begonnen wurde und nach Projektabschluss fortgesetzt wird.

Vorgehen. Bei der Erhebung wird der Brennholzpreis inklusive Anlieferung zum Verbraucher festgestellt. Die notwendigen Angaben werden halbjährlich telefonisch nach dem Muster eines Fragebogens abgefragt. Bei einigen Anbietern erfolgt die Preisfeststellung auch durch Faxabruf oder – sofern die nötigen Angaben vorliegen – aus Preislisten im Internet auf der Homepage des Anbieters. Gefragt wird nach ofenfertigem (Wassergehalt $w \leq 20$ %) Holz in Meterscheitlänge und/oder mit 33 cm Länge, unterteilt nach Hartholz und Weichholz. Somit ergeben sich vier verschiedene Sortimente und Preise. Die Zuordnung zum Hartholz erfolgt für alle Holzarten mit einer Darrdichte (wasserfrei nach Schwindung) von $\varsigma_0 \geq 550$ kg/m³; bei geringeren Darrdichten handelt es sich definitionsgemäß um Weichholz [45]. Nicht ermittelt wird der Preis für Rundholz, Altholz, Sägerestholz oder Holzbriketts. Die erfragte Standardabnahmemenge wurde auf 6 Raummeter festgesetzt, hierbei handelt es sich nach HARTMANN UND MADEKER [26] um die am häufigsten nachgefragte Scheitholzmenge bei zugekauftem Holz. Werden unterschiedliche Preise für Hölzer einer Holzartengruppe genannt (etwa für Buche und Birke), so wird der Durchschnitt der Preise notiert. Die Lieferung bis 10 km um den Ort der Bearbeitung ist im Preis enthalten oder wurde extra erfragt, das eventuelle Schichten des Holzes beim Kunden ist dagegen nicht berücksichtigt. Neben den Preisen wird auch erfragt, ob es sich um Angaben mit oder ohne Mehrwertsteuer handelt, außerdem wird der jeweilige Mehrwertsteuersatz festgehalten.

Die befragten Brennholzanbieter wurden heterogen aus fünf Gruppen ausgewählt: Waldbauern, private Forstbetriebe, Forstbetriebsgemeinschaften (FBG), Waldbesitzervereinigungen (WBV) und Brennstoffhandel. Nicht befragt wurden Bau- oder Verbrauchermärkte, da die festgelegte Referenzmenge von 6 Raummetern kaum in Form der typischerweise meist kleineren Verkaufgebinden (z. B. 12,5 kg im "Raschelsack") eingekauft wird, zumal bei derartigen kleinen Verkaufseinheiten erhebliche Preisnachteile für den Käufer bestehen. Auch bei staatlichen Forstbetrieben wurden keine Preise erhoben, weil das Holz hier meist nur frisch und ab Wald verkauft wird. Gleichermaßen finden auch brennholztaugliche stückige Sägenebenprodukte hier keine Berücksichtigung.

Insgesamt wurden 28 Anbieter für die regelmäßig wiederkehrende Befragung ausgewählt, wobei die folgenden Quellen für die Adressen verwendet wurden: Broschüre des Bayerischen Waldbesitzerverbandes „Bayerisch heizen“ [5], die entsprechende baden-württembergische Broschüre

„Heizen mit heimischem Holz“, Werbeannoncen der Zeitschrift „energie pflanzen“, im Internet gelistete Anbieter unter "www.brennholz.com", Gelbe Seiten der deutschen Telekom sowie Anbieterlisten von C.A.R.M.E.N. e.V. in Straubing. Es wurden nur Anbieter ausgewählt, die zumindest 33-er Hartholzscheite anbieten, meist werden aber gleichzeitig noch weitere Sortimente verkauft, deren Preise ebenfalls festgestellt werden.

Um die Preise für das gesamte Bundesgebiet möglichst repräsentativ abzubilden, wurde versucht, Anzahl und regionale Verteilung der Befragten nach der Häufigkeit des Holzenergieeinsatzes in der jeweiligen Region festzulegen. Zum einen geschah dies in Anlehnung an die nach Bundesländern differenzierte Verteilung der im Jahr 2000 neu errichteten Holzfeuerungsanlagen in Deutschland. Hierbei wurde auf eine Statistik der in den einzelnen Bundesländern nach dem Markteinführungsprogramm für erneuerbare Energiequellen geförderten Biomasseanlagen zurückgegriffen. Zusätzlich dazu wurde als zweites Verteilungskriterium auch die vorhandene Waldfläche berücksichtigt. Die gewünschte prozentuale Verteilung der Befragten im Bundesgebiet wurde schließlich durch eine 2 : 1-Gewichtung der beiden Kriterien ermittelt. Beispielsweise hätte eine ausschließliche Verteilung nach der Anzahl der im Jahr 2000 geförderten Holzfeuerungsanlagen für Bayern einen 56%igen Anteil der Befragten erforderlich gemacht, während bei einer Verteilung nach dem bayerischen Waldflächenanteil nur ein 24%iger Anteil gerechtfertigt wäre. Durch die 2 : 1-Gewichtung ergibt sich nun ein Zielwert von 45 % für Bayern; mit 12 von 28 Befragten ist dieser Zielwert gut erreicht. Die übrigen Befragten verteilen sich auf die Bundesländer wie folgt: Baden-Württemberg 4, Nordrhein-Westfalen 3, Niedersachen und Brandenburg je 2 und Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Schleswig-Holstein und Thüringen je 1. Wegen des großen zeitlichen Aufwandes für die wiederkehrende Befragung musste die Anzahl der befragten Anbieter auf 28 begrenzt werden, so dass aus 6 Bundesländern mit relativ geringer Brennholznutzung keine Preisangabe berücksichtigt werden konnte. Ohnehin wird mit der Befragung vorrangig das Ziel verfolgt, preisliche Veränderungen im Zeitverlauf festzustellen, dieses Ziel kann mit der hier gewählten Beschränkung der Anbieterkreises hinreichend genau erreicht werden.

Bei den Preisangaben der befragten Anbieter ist die Bezugsbasis uneinheitlich. In den meisten Fällen beziehen sich die Originalpreise auf das gestapelte Holz, das gilt vor allem für Meterholz, bei dem sich 100 % aller Angaben auf Schichtholzware beziehen. Beim Weichholz als Kurzholz (33 cm) machen 64 % der Befragten eine Preisangabe für geschichtetes Holz, die übrigen 36 % beziehen sich auf den Schüttraummeter, beim Hartholz als Kurzholz (33 cm) geben 61 % der Befragten die Preise für geschichtetes Holz an und die übrigen 39 % beziehen sich auf den Schüttraummeter. Gewichtsbezogene Angaben kamen in der Befragung nicht vor, in der jüngeren Praxis hat sich allerdings gezeigt, dass eine Vermarktung nach Massenangaben zunimmt.

Damit die Preisangaben vergleichbar sind, wurden alle Angaben einheitlich auf die Holzmenge eines gestapelten Meterscheit-Raummeters (gespalten) umgerechnet. Aufgrund der signifikanten Unterschiede auch bei den Schichtholzsortimenten (gespaltene Meterscheite, Rundlinge, 33-er Scheite) wurde sehr genau hinterfragt, in welcher Aufbereitungsform das Holz vermarktet wird und welches das für den Preis relevante Bezugssortiment war. Zum Teil war eine solche Umrechnung jedoch nicht erforderlich, da von vielen Anbietern bereits angegeben wurde, dass sich ihre Preise auf das Volumen des Ausgangssortiments, nämlich gespaltene und gestapelte Meterscheite beziehen. In fünf Fällen bezog sich die Original-Preisangabe bei Schichtholz jedoch bereits auf das Kurzholzvolumen und in einem Fall auf gestapeltes Rundholz. Aus Gründen der Vergleich-

barkeit mussten die Preise bei diesen Sortimenten auf das gespaltete Meterholzsortiment umgerechnet werden. Auch wenn die Preise für geschüttete Ware angegeben wurden, war eine Umrechnungen in das Schichtmaß erforderlich. In diesen Fällen wurden die im vorliegenden Forschungsprojekt ermittelten eigenen Umrechnungsfaktoren verwendet (vgl. Kapitel 5.6.1).

Die Tatsache, dass in der Praxis und auch bei der hier durchgeführten (ersten) Befragung die Angabe des Bezugssortiments für die Preisnennung oft erst auf Nachfrage und nicht immer eindeutig erfolgt, kann beim Kunden zu Missverständnissen führen. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn dieser bei einem erneuten Aufstapeln des gelieferten Kurzholzes den Volumenunterschied zum Meterholz (Referenzmaß) bemerkt und hierfür keine Erklärung vom Verkäufer erhalten hat. Wegen der zum Teil deutlichen Volumenunterschiede wäre aus Kundensicht im Handel eine eindeutigere Preiszuordnung wünschenswert (zu den Volumenumrechnungsfaktoren vgl. 5.6.1).

Ergebnisse zum Scheitholzpreis. Tabelle 45 zeigt eine Übersicht über die im Brennholzhandel geforderten Scheitholzpreise mit Stand vom Januar 2006. Demnach liegt der mittlere Preis für das frei Haus gelieferte 33-er-Hartholzsortiment bei durchschnittlich 70,18 €/Rm, während das gleiche Holz im Meterscheitformat für 55,21 €/Rm erhältlich ist. Beim Weichholz liegen die Raummeterpreise erwartungsgemäß niedriger, die Kurzscheite sind schon für 52,26 € erhältlich. Wird allerdings der energiemengenbezogene Preis verglichen, so ergibt sich bei Kurzscheiten Weichholz (33 cm) sogar ein mittlerer Preisnachteil von 0,35 €/GJ gegenüber Kurzscheiten Hartholz, das entspricht einer Differenz von 1,24 Cent je Liter Heizöläquivalent H_{EL} (Tabelle 45). Die Preisspanne reicht bei Hartholz (33 cm) von 0,30 bis über 0,83 €/l H_{EL}. Den Maximalwert (131 €/Rm) markiert hierbei ein Anbieter von gestapeltem ofengetrocknetem Holz, welches in Einweg-Holzboxen à 1,4 Rm angeliefert wird und somit dem Kunden ein weiteres Aufstapeln erspart. Das nächst teurere Angebot (lose angelieferte Ware) liegt mit 86,75 €/Rm schon deutlich niedriger. Beim Weichholz (33 cm) reicht die Preisspanne von 0,31 bis 0,75 €/l H_{EL}.

Die hier dargestellte Berechnung der Preise je Liter Heizöläquivalent erfolgt über die Umrechnung in Festmeter (vgl. Kapitel 5.6.1) und dieses Volumen wird anschließend über die Rohdichte in die tatsächliche Holzmasse umgerechnet, welche wiederum mit dem Heizwert multipliziert wird. Als Rohdichten (wasserfrei) für Hartholz (hier: Buche) und Weichholz (hier: Fichte) wurden 0,68 bzw. 0,43 g/cm³ angenommen [39]. Bei der Dichteberechnung für einen Wassergehalt von 15 % wurde ab dem jeweiligen Fasersättigungspunkt eine lineare Schwindung und ein Schwindmaß von 17,9 % (Buche) bzw. 11,9 % (Fichte) angerechnet [39]. Damit beträgt die tatsächliche Dichte des Fichtenholzes bei 15 % Wassergehalt 0,472 g/cm³ und bei Buchenholz 0,716 g/cm³. Als Heizwerte bei 15 % Wassergehalt wurden 15,53 (Fichte) bzw. 15,29 MJ/kg (Buche) verrechnet.

Im Durchschnitt aller Befragten wird für die Brennholzanlieferung an einen ca. 10 km entfernten Kunden ein mengenunabhängiger pauschaler Zuschlag von 23,72 € je Lieferung verlangt. Bei einer Referenz-Liefermenge von sechs Raummetern errechnet sich somit ein mittlerer Lieferpreiszuschlag von 3,95 €/Rm. Die Spannweite für die Lieferpauschale reicht von 0 bis 72,29 € pro Fahrt.

Tabelle 45: Die Scheitholzpreise im Januar 2006. Angaben frei Haus (Entfernung bis 10 km) für eine Abgabemenge von jeweils 6 Raummetern geschichtetes Holz (Angaben inkl. MwSt; die MwSt. beträgt laut Angabe der Befragten entweder 5, 7 oder 9 %)

Sortiment/Holzart	Anzahl Nennungen	Preisangabe (Mittelwert und Spanne)		
		€/Rm[a]	€/GJ	€/l Heizöl[b]
Meterware *Hartholz, gespalten*	16	55,21 *(37,00-85,00)*	9,82	0,35
Meterware *Weichholz, gespalten*	8	37,79 *(27,00-66,67)*	9,28	0,33
33 cm Scheite[a] *Hartholz gespalten*	28	70,18 *(48,00-131,71)*	12,49	0,44
33 cm Scheite[a] *Weichholz gespalten*	14	52,26 *(35,00-85,66)*	12,84	0,46

[a] Preisangaben bezogen auf Meterscheitholzvolumen (gespalten). Preisunterschiede zwischen Meterscheiten und Kurzholz sind somit nicht auf unterschiedliche Holzmassen im jeweiligen Raummetermaß zurückzuführen.

[b] Preis je Liter Heizöläquivalent H_{EL}. 1 l Heizöl EL ("Extra Leicht") entspricht 9,88 kWh.

Preisverlauf. Durch Darstellung aller Netto-Preisveränderungen (ohne MwSt.) im Vergleich zu den jeweiligen Ausgangspreisen zu Beginn der Erhebung im November 2001 ergibt sich eine Darstellung des Preisverlaufes (Abbildung 121). Die wegen der unterschiedlichen Nachfrage zu erwartenden jahreszeitlichen Preisschwankungen zwischen Sommer und Winter (hier: Erhebung im Juli und Januar) treten nicht auf. Wegen des steigenden Scheitabsatzes erhöhte sich aber der Preis für kurze Scheite seit Erhebungsbeginn erwartungsgemäß im Durchschnitt um ca. 8 €/Rm bei Hartholz und um ca. 3 €/Rm bei Weichholz. Der Preis für Meterware reduzierte sich dagegen im gleichen Zeitraum um ca. 0,50 €/Rm bei Hartholz und um ca. 4 €/Rm bei Weichholz. Relativ gesehen konnte im Betrachtungszeitraum ein Preisanstieg bei kurzen Scheiten von ca. 14 % bei Hartholz und ca. 7 % bei Weichholz beobachtet werden. Der Preis für Meterware reduzierte sich im Betrachtungszeitraum bei Hartholz um ca. 1 % und bei Weichholz um ca. 10 %.

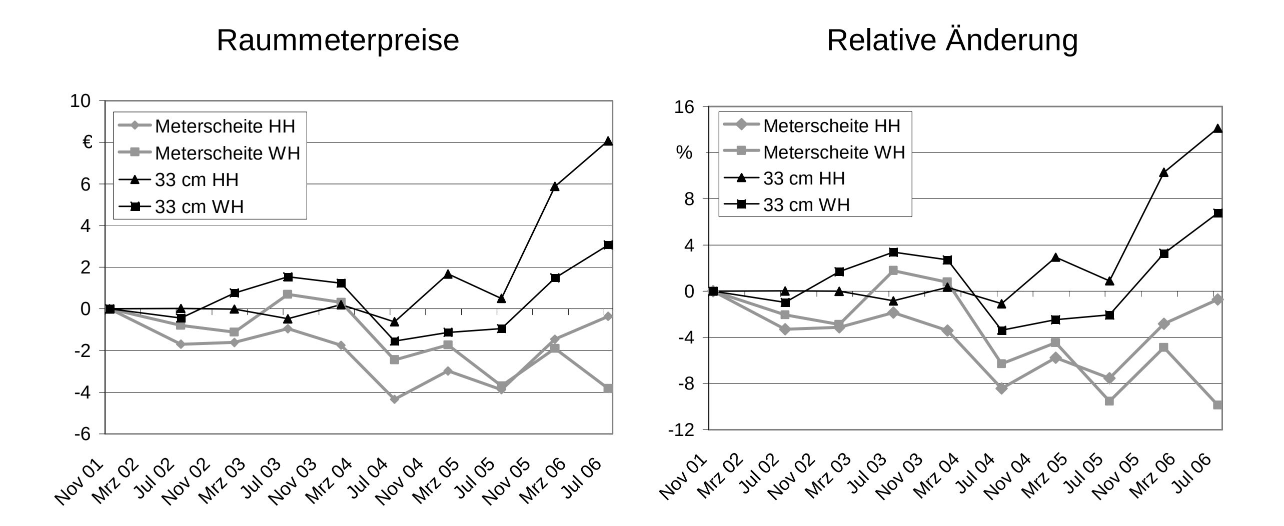


Abbildung 121: Scheitholzpreisverlauf von 2001 bis 2006

8 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund steigender Energiepreise erleben Holzheizungen derzeit einen Aufschwung. Dieser Aufschwung ist nicht nur die Folge der vielen Neuinstallationen von Feuerungen, sondern auch durch die Tatsache begründet, dass der Brennstoff vielfach derzeit im Gebäudebestand "wiederentdeckt" wird und dabei zunehmende Holzmengen in bereits vorhandenen Anlagen eingesetzt werden. Vor allem Scheitholz profitiert von dieser Entwicklung, folgerichtig stellt sein Anteil mit ca. 45 % unverändert den größten Einzelbeitrag der in Bayern eingesetzten Biomassebrennstoffe dar.

Der Anstieg der Nachfrage in den vergangenen Jahren führt aber bereits zu einer Verknappung von "ofenfertigem" Scheitholz. Um Engpässe in der Versorgung und größere Preissteigerungen zu vermeiden ist daher eine Rationalisierung der Scheitholzproduktion erforderlich. Da es sich bei der Scheitholzbereitstellung um eine relativ vielfältig ausgestaltete Verfahrenskette mit einer großen Bandbreite unterschiedlicher Mechanisierungsverfahren handelt, sind viele Verfahren und Prozessketten denkbar. Eine systematische Zusammenstellung von Bewertungskenngrößen und Planungszahlen fehlt aber bisher. Das betrifft die verfahrensabhängigen holzmengenspezifischen Arbeitszeit- und Energiezeitbedarfzahlen, die eine wichtige Basis für differenzierte Kostenrechnungen und Vergleiche darstellen, aber auch Fragen nach den besonderen körperlichen oder gesundheitlichen Belastungen, die mit der unterschiedlichen Schwere der zu leistenden Arbeit verbunden sind. Weitere Kenntnislücken bestehen bei der Lagerung, vor allem hinsichtlich der erforderlichen Lagerungsdauer bis zur Brennstoffverwertung und der dabei auftretenden Lagerungsverluste. Auch für das Volumenmaß und die Umrechnung in andere Sortimente und Holzarten liegen bislang keine differenzierten Planungszahlen vor.

Für eine Weiterentwicklung der Scheitholzproduktion sind somit eine Vielzahl von Kenntnislücken zu schließen und geeignete belastbare Planungszahlen zu erarbeiten, die für eine (hier ebenfalls durchgeführte) Prozesskettenanalyse benötigt werden. Mit dem vorliegenden Forschungsprojekt sollte hierzu ein Beitrag geleistet werden. Letztlich soll damit auch einer zukünftig erwarteten Verknappung des Brennholzangebotes bei gleichzeitig steigender Nachfrage begegnet werden.

Spezifischer Arbeitszeitbedarf. Für die umfangreich durchgeführten Arbeitszeitstudien zur Holzernte (Jungdurchforstung) und zur Scheitholzaufbereitung mittels Axt, verschiedenen Spaltern und Brennholzmaschinen sowie Bündelhilfen wurde eine Methode mit PDA (Personal Digital Assistant) in Kombination mit einer spezieller Auswertesoftware an die speziellen Erfordernisse der Brennholzbereitstellung angepasst. Es wurden insgesamt 40 Zeitstudien durchgeführt.

Acht Zeitstudien wurden zur Holzernte mit Selbstwerbern durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) je nach Arbeitsbedingungen zwischen 0,18 und 1,42 Festmeter (Fm) je Arbeitskraftstunde (AKh) stark streuen kann. Das ist neben den Holzartenunterschieden (hier Fichte, Kiefer, Buche, Esche, Ahorn) auch auf das unterschiedliche Leistungsvermögen der einzelnen Probanden, die verschiedenen Holzernte-Verfahren und die unterschiedlichen Arbeitsbedingungen in den Beständen zurückzuführen. Im Durchschnitt aller Teilstudien ergibt sich ein Wert von 0,56 Fm (mit Rinde) je AKh. Diese technische Arbeitsproduktivität liegt damit sogar leicht über den Werten, die im Bereich Brennholz im Einheitssortentarif

(EST) angegeben werden. Es wird ein Modell erarbeitet, durch welches der Zeitbedarf für die Brennholzernte über den mittleren Mittendurchmesser der Bäume ermittelt werden kann.

Zu den Aufbereitungsverfahren für Scheitholz wurden 32 Zeitstudien bei Brennholzhändlern und Selbstwerbern mit praxisüblichen Rohholzsortimenten durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die tatsächlich eingesetzte Rundlingstärke meist unter dem arbeitswirtschaftlich optimalen Durchmesser liegt, so dass die erreichte Leistung meist unter der vom Hersteller angegebenen Leistung bleibt. Dies gilt vor allem für die kombinierten Säge-Spaltmaschinen, bei denen der tatsächliche mittlere Durchmesser des Ausgangsmaterials (15,2 cm bei kleinen und 25,9 cm bei den großen Maschinen) weit unter dem technisch optimalen Durchmesser lag. Generell steigt die Produktivität bei der Brennholzaufbereitung mit zunehmendem Grad der Mechanisierung von 0,49 Fm/AKh (kleiner Senkrechtspalter) auf 6,03 Fm/AKh (große kombinierte Säge-Spaltmaschinen).

Kurzeitig ist auch beim händischen Spalten (Axt, Spalthammer) eine mit dem kleinen Senkrechtspalter nahezu vergleichbare Produktivität erreichbar, allerdings ist festzustellen, dass die Ermüdung bei diesen Arbeiten früher einsetzt. Für das anschließende Aufschichten der gespaltenen 33 cm-Scheite (ohne Bündelhilfe) ist bei beiden Holzarten (Buche und Fichte) eine technische Arbeitsproduktivität (TAP) von 3,0 Rm/AKh anzusetzen, das entspricht umgerechnet 1,9 Fm/AKh. Größere Holzartenunterschiede von 1,36 bis 3,90 Fm/AKh (Buche und Fichte) ergaben sich dagegen bei den kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschinen. Zu berücksichtigen ist bei diesen Leistungsvergleichen allerdings, dass – außer bei den Säge-Spaltmaschinen – das Holz vor oder nach dem Spalten noch geschnitten werden muss und dass dieser Vorgang noch einmal etwa den gleichen Aufwand wie das Spalten selbst erfordert. Ein direkter Vergleich der Aufbereitungsverfahren ist somit nur durch Aggregierung aller Teilleistungen in einer vollständigen Prozesskette zulässig (siehe unten "Prozesskettenanalysen").

Arbeitsschwere bei der Brennholzbereitstellung. Beim Messen der körperlichen Belastung am Arbeitsplatz sollte der Proband möglichst unbeeinflusst bleiben. Um diese Vorgabe zu erfüllen, wurde in der vorliegenden Untersuchung eine für die Stahlindustrie entwickelte Methode adaptiert, die sogenannte OWAS-Methode (Ovako Working Posture Analysing System). Hierbei wird anhand von Beobachtungen zur Körperhaltung der Arbeitskräfte ein Index erstellt, durch den die unterschiedlichen Arbeitsabläufe hinsichtlich der körperlichen Belastung vergleichbar werden. Bei der OWAS-Methode werden die Arbeitshaltungen einer oder mehrerer arbeitender Personen nach dem Multimomentverfahren ermittelt. Dazu wurden Bilder aus mehrstündigen Videoaufzeichnungen im 30-Sekundenabstand ausgewertet. Insgesamt wurden hierzu 3891 Bilder verwendet, die sämtliche relevante Verfahrensabschnitte von der Holzernte im Wald über die Aufbereitung bis hin zum Stapeln und Laden beschreiben, wobei gegebenenfalls auch die eingesetzten Hilfskräfte (z. B. für das Zubringen von Holz) beobachtet wurden. In der Verfahrenskette anfallende sitzende Tätigkeiten (z. B. Kranführer, LKW-Fahrer) mussten hierbei nicht extra bewertet werden, sie bekommen einheitlich einen Arbeitschwereindexwert von 100 zugewiesen.

Die Ergebnisse zur Arbeitsschwere zeigen, dass der Grad der Belastung mit zunehmender Mechanisierung stark abnimmt. Die OWAS-Indices der Arbeitsbelastung für "Durchforsten", "Spalten mit der Axt" und "Zubringen" liegen mit L=186, L=179 und L=176 relativ hoch. Bei den Verfahren "Brennholzkreissäge", "Senkrechtspalter" und "Bündelhilfe" liegen sie mit ca. L=140 im mittleren Bereich, während die Werte der Verfahren "Waagerechtspalter" und "Spaltautomat" mit

Werten von L=109 bis 118 erwartungsgemäß am niedrigsten sind. Hierbei zeigt sich auch eine relativ hohe Übereinstimmung der OWAS-Werte mit den subjektiven Einschätzungen, die im Rahmen einer hier ebenfalls zur Scheitholzbereitstellung durchgeführten Befragung unter 60 Personen festgestellt wurde. In der Mechanisierung – vor allem mit Säge-Spaltmaschinen – liegt somit eine sinnvolle Maßnahme zur Verringerung der zum Teil relativ hohen Arbeitsbelastung der mit der Brennholzbereitstellung befassten Personen.

Spezifischer Energieverbrauch. Parallel zu den Arbeitszeitmessungen wurde der Energieverbrauch der Verfahren bestimmt, wodurch eine direkte Zuordnung zur jeweils produzierten Brennstoffmenge möglich wurde. Beispielsweise sind für das Spalten mit dem kleinen Senkrechtspalter ca. 1,4 bis 1,8 kWh elektrischen Stroms je Festmeter Holz anzusetzen. Bei großen Senkrecht- oder Waagerechtspaltern kann dieser Wert auf weniger als ein Drittel sinken. In der Praxis werden derartige Maschinen jedoch meist nicht elektrisch betrieben, sondern sie werden ohne Stromanschlussmöglichkeit (z. B. im Wald) eingesetzt und müssen dann über die Zapfwelle eines Traktors angetrieben werden. Dadurch vervielfacht sich der Energieverbrauch auf Werte von 5,1 bis 15,4 kWh/Fm.

Erforderliche Lagerdauer. Für die energetische Nutzung in Scheitholzfeuerungen müssen Holzscheite weniger als 20 % Wassergehalt aufweisen. Die Trocknung erfolgt meist während einer längerfristigen Lagerung. In der vorliegenden Untersuchung wurden Lagerungsversuche mit insgesamt 37 Raummetern Fichten-, Buchen- und Kiefernholz durchgeführt. Zur Bestimmung des Wassergehaltsverlaufs wurden die zu Bündeln verzurrten Holzchargen über 1 bzw. 2 Jahre monatlich gewogen. Klimatischen und jahreszeitlichen Unterschieden wurde durch die Wahl zweiter unterschiedlicher Standorte in Bayern (Freising und Kempten) bzw. durch eine Versuchswiederholung in 2004 (nach dem "Jahrhundertsommer" in 2003) Rechnung getragen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der für die Verbrennung geforderte maximale Wassergehalt von 20 % unter günstigen Lagerungsbedingungen schon nach weniger als einem Jahr Lagerdauer erreicht werden kann. Das gilt für Buchen-, Fichten- und Kiefernholz gleichermaßen, aber auch für gespaltene und ungespaltene Scheite, mit und ohne Abdeckung der Stapel, im Freien wie auch in luftigen halboffenen Lagerschuppen. Voraussetzung hierfür ist ein trockener, windiger Lagerort mit ausreichendem Abstand der Holzstapel voneinander und von Hauswänden. Diese Bedingungen sind beispielsweise bei einer Lagerung im Wald oder in Garagen nicht gegeben.

Unter solchen günstigen Bedingungen setzt die Trocknung beim frisch geschlagenen Holz schon unmittelbar mit Lagerbeginn in den Wintermonaten ein. In einem warmen Sommer, wie beispielsweise im Jahr 2003, unterschreitet das Holz bei günstigen Lagerungsbedingungen bereits im Juni den für die Verbrennung geforderten Maximalwassergehalt von 20 %. Die Unterschiede zum feuchteren Sommer können als eher gering angesehen werden, da im feuchteren Jahr 2004 die 20 %-Marke nur etwa einen Monat später erreicht wurde. Im April ist der Wasserverlust durchgehend am höchsten, wobei monatliche Trocknungswerte um 90 Liter Wasser je Raummeter erreicht werden. Fichtenholz trocknet ab Mai schneller als Buchenholz; wegen seiner niedrigeren Dichte ist hier allerdings auch die absolute Wassermenge in einem Raummeter Fichtenholz trotz des höheren Start-Wassergehalts geringer. Abgedecktes Holz trocknet in den Wintermonaten zunächst etwas rascher; diesen Vorsprung kann das nicht abgedeckte Holz jedoch in den Sommer-

monaten wieder aufholen. Ungespaltenes Holz muss im Vergleich zu gespaltenem Holz etwa zwei (Sommer-)Monate länger trocknen, um unter 20 % Wassergehalt zu gelangen.

Lagerungsverluste. Der Vergleich der Gesamttrockenmassen zu Lagerbeginn und Lagerende ermöglicht auch eine Abschätzung der Trockenmasseverluste über die gesamte Lagerdauer von 24 Monaten. Bei innengelagerten Meterstücken lag dieser Verlust bei durchschnittlich 2,6 % (für 2 Jahre) und damit niedriger als bei Außenlagerung (5,7 %). Für die Aufbereitungsformen (gespalten/ungespalten) und Holzarten (Buche/Fichte) ist keine weitere Differenzierung möglich. Wegen der großen Streuung der Einzelwerte sind die Verlustdaten nicht statistisch abgesichert. Sie wurden jedoch dazu verwendet, die Zeitreihen für den Wassergehaltsverlauf bei der Lagerung durch lineare Interpolation über jeweils 1 bzw. 2 Versuchsjahre zu korrigieren.

Umrechnungsfaktoren für Volumina. Durch eine Vielzahl von Stapel- und Schüttversuchen in einem Standardmessrahmen wurden die Faktoren zur Umrechnung massengleicher Volumina für verschiedene Scheitholzsortimente bestimmt. Dies war erforderlich, da der üblicherweise verwendete pauschale Umrechnungsfaktor (1 Rm = 0,7 Fm), der auf alle Schichtholzsortimente angewendet wird, für die wissenschaftlichen Auswertungen zu den Arbeitszeit- und Energiebedarfsmessungen zu unsicher gewesen wäre und außerdem keine Differenzierung zwischen gespaltenem und ungespaltenem Holz sowie zwischen Meterholz und Kurzholz möglich war. Die hier durchgeführten Messungen erfolgten mit insgesamt 12 Raummetern Buchen- und Fichtenholz, die zu verschiedenen Sortimenten weiterverarbeitet und in insgesamt 222 Versuchen in einen Messrahmen gestapelt bzw. geschüttet wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Raummeter Brennholz in Form von geschichteten, gespaltenen Meterscheiten aus durchschnittlich 0,50 Festmetern (Fm) Buchenholz bzw. 0,55 Fm Fichtenholz hervorgeht. Zwischen den gespaltenen Meterscheiten und den beiden übrigen Schichtholzsortimenten bestehen allerdings nennenswerte Unterschiede. Sie bewirken, dass ein Brennholzkunde, der sich vom Verkäufer einen Raummeter gespaltenes Meterholz ofenfertig aufbereiten lässt, bei der Anlieferung als 33-er Kurzscheite nur noch 0,81 Rm (Buche) bzw. noch 0,86 Rm (Fichte) erhält. Diese Zahlen verdeutlichen, dass sich kürzere Scheite platzsparender, das heißt mit weniger Zwischenraum schichten lassen. Unebenheiten und Biegungen im Holz können sich hier weniger stark hohlraumbildend auswirken. Auch bei den Rundlingen bewirkt der runde Querschnitt eine dichtere Packung als bei den unregelmäßigen Querschnittsformen der gespaltenen Meterscheite. Die Ergebnisse zeigen, dass die Umrechnungsfaktoren vor allem bei Schüttgut differenziert für verschiedene Holzarten verwendet werden sollten.

Prozesskettenanalysen. Die voranstehend vorgestellten Ergebnisse zu den verschiedenen Teilverfahren und Verfahrensabschnitten lassen sich erst im Verbund mit den weiteren vor- oder nachgelagerten Verfahrensschritten sinnvoll bewerten. Diese Bewertung wurde im Rahmen einer Prozesskettenanalyse vorgenommen, wobei die unterschiedlichen Bausteine einer Verfahrenskette beispielhaft miteinander kombiniert wurden. Nach einer vorangegangenen Befragung unter 81 Selbstwerbern wurden vier Modellverfahrensketten ("Pfade") definiert, die die Bandbreite der Einsatzfälle vom Freizeit-Selbstwerber ("Pfad 1") über den Waldbauern mit geringer ("Pfad 2") bzw. höherer ("Pfad 3") Mechanisierung bis hin zum professionellen Scheitholzgewerbe ("Pfad 4") abdecken. In diesen Prozessketten, die auch die jeweiligen Transport- und Umschlagsarbeiten berücksichtigen, wurden die jeweiligen Teilverfahrensschritte hinsichtlich ihres spezifi-

schen Arbeitszeitbedarfs, der Arbeitsschwere, des spezifischen Energieverbrauchs und der im einzelnen hergeleiteten oder speziell berechneten Maschinen- und Verfahrenskosten aufaddiert.

Die Prozesskettenberechnung weist für den spezifischen Arbeitszeitbedarf vom Wald bis zum Endverbraucher je nach Mechanisierungsgrad von Pfad 1 bis Pfad 4 eine Arbeitszeitsumme von 3,59 bis 0,31 AKh/Rm aus, wobei der höchste Wert dem des Freizeitselbstwerbers entspricht und der niedrigste dem professionellen Brennholzunternehmer zuzuordnen ist. Ersterer verwendet mehr als die Hälfte seiner Arbeitszeit für das Aufbereiten (Sägen und Spalten), während es bei den übrigen Mechanisierungsstufen nur noch zwischen 30 und 37 % sind.

Auch die oben genannten OWAS-Werte der Arbeitsschwere lassen sich nach den Zeitanteilen in der jeweiligen Verfahrenskette gewichten. Die Ergebnisse zeigen, dass die höchste Mechanisierung zwar die geringste Arbeitsbelastung nach sich zieht. Der Umkehrschluss ist aber nicht zutreffend, da es von Pfad 1 zu Pfad 2 trotz höherer Mechanisierung zu einem bemerkenswerten – wenn auch geringen – Anstieg der Arbeitsschwere kommt. Hier wirkt sich aus, dass die eher wenig belastenden Arbeiten am großen Spalter in "Pfad 2" deutlich schneller ablaufen, wodurch sich der prozentuale Anteil der übrigen – zum Teil schwereren – Arbeiten der Prozesskette erhöht, so dass diese rechnerisch stärker gewichtet werden müssen.

Auch die einzelnen Energieaufwendungen werden in den vier Modell-Prozessketten zu einem Summenwert aufaddiert. Demzufolge wendet der Freizeit-Selbstwerber (Pfad 1) für die gesamte Bereitstellung besonders wenig Energie je Festmeter ofenfertiges Scheitholz auf. Sein aggregierter Verbrauchswert ist mit 8,9 kWh/Fm erwartungsgemäß am niedrigsten, er könnte durch Verwendung einer Axt anstelle des kleinen Senkrechtspalters sogar noch weiter abgesenkt werden. Auf Grund der steigenden Transportaufwendungen und des höheren Mechanisierungsgrades steigt der Energieaufwand in den drei übrigen Prozessketten auf 12,5 kWh/Fm (Pfad 2), 22,5 kWh/Fm (Pfad 3) auf 47,4 kWh/Fm (Pfad 4) und liegt schließlich bei mehr als dem Fünffachen des Freizeit-Selbstwerbers. In allen Prozessketten nehmen hierbei die Transporte den größten Einzelanteil ein.

Gemessen am Energiegehalt des bereitgestellten Scheitholzes sind diese Aufwendungen jedoch gering. Beispielsweise errechnet sich für eine Buchenholzbereitstellung in Pfad 1 ein Input-Outputverhältnis der Endenergieträger von 0,0029, das bedeutet, dass nur ca. 0,3 % der Scheitholzenergiemenge in Form von Endenergieträgern investiert werden muss. Beim energieintensiveren Pfad 4 sind es dagegen ca. 1,6 % (Buche) bzw. ca. 2,6 % (Fichte) des Holzenergieertrags. Aber auch wenn man anstelle der Endenergieträger den sogenannten "kumulierten Primärenergieverbrauch" betrachtet, der auch die speziellen Energieaufwendungen für die Dieselkraftstoff- und Strombereitstellung enthält, so errechnet sich für die Scheitholzbereitstellung weiterhin eine besonders günstige Energiebilanz. Der Primärenergieaufwand liegt bei dieser Betrachtungsweise bei 0,5 bis 3,2 % der bereitgestellten Scheitholzenergie.

Ein wichtiges Ziel der hier durchgeführten Prozesskettenanalyse war auch die Berechnung der Gesamtkosten der Scheitholzproduktion. Auch hier zeigt sich – wie schon beim Arbeitszeitbedarf – ein deutlich positiver Effekt einer höheren Mechanisierung. Die aggregierten Gesamtkosten der hier definierten Modell-Prozessketten liegen bei ca. 55 €/Rm für die Scheitholzbereitstellung in Pfad 1 („Freizeit-Selbstwerber“) und reduzieren sich bei Pfad 3 auf 32 €/Rm, während sie bei

Pfad 4 (professioneller Scheitholzproduzent) wieder leicht auf ca. 34 €/Rm ansteigen (jeweils bezogen auf 1 Rm gestapelte Kurzscheite und inkl. 10 €/Rm für den Rohholzankauf). Diese Kostenreduzierung bei Pfad 3 und Pfad 4 ist allerdings nur möglich, wenn eine für die jeweiligen Investitionen angemessene Auslastung der Maschinen erreicht wird. Dadurch sinken auch die Lohnkostenanteile der Prozesskette von 92 bzw. 89 % (Pfad 1 und 2) auf nur noch 46 bzw. 25 % (Pfad 3 und 4).

Die betrachteten vier Pfade sind aber nicht als Verfahrensalternativen, sondern als nebeneinander existierende Produktionsketten mit unterschiedlichen Einsatzoptima zu interpretieren. Vielfach sind in der Praxis auch abweichende Berechnungsannahmen erforderlich. Für einen Selbstwerber, beispielsweise, der nur eine geringe Brennholzmenge benötigt, ist eine Anrechnung von Lohnkosten (hier 11,46 und 15,24 €/h für Arbeiter bzw. Maschinenführer) oft nicht sinnvoll, wenn dieser die Waldarbeit als Bewegungsausgleich für eine sitzende Tätigkeit auffasst. In diesem Fall sinken die Gesamtkosten von 54,52 €/Rm (33-er Scheite, mit Rohholzkauf) relativ deutlich auf nur noch 13,52 €/Rm, da die Bereitstellung im Pfad 1 sehr arbeitsintensiv ist.

Marktpreise für Brennholz. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde am TFZ seit dem Jahr 2002 eine regelmäßige und auch zukünftig fortzusetzende Preisfeststellung für verschiedene Scheitholzsortimente begonnen. Im Rahmen einer halbjährlichen deutschlandweiten Befragung bei insgesamt 28 Anbietern wurden die Endverkaufspreise für Hart- und Weichholz in 33-er Kurzscheiten oder ggf. auch als Meterscheite erfragt.

Demnach liegt der mittlere Preis für das frei Haus gelieferte 33-er-Hartholzsortiment bei durchschnittlich 70,18 €/Rm, während das gleiche Holz im Meterscheitformat im Mittel für 55,21 €/Rm erhältlich ist (Stand: Juli 2006). Beim Weichholz liegen die Raummeterpreise erwartungsgemäß niedriger, die Kurzscheite sind schon für 52,26 €/Rm erhältlich. Alle Preise gelten für das Holzvolumen von gespaltenen Meterscheiten, um einen einheitlichen Massenbezug zu gewährleisten. Wird allerdings der energiemengenbezogene Preis verglichen, so ergibt sich bei Kurzscheiten Weichholz (33 cm) sogar ein mittlerer Preisnachteil von 0,35 €/GJ gegenüber Hartholz-Kurzscheiten, das entspricht einer Differenz von 1,24 Cent je Liter Heizöläquivalent H_{EL}.

In jedem Fall liegen die Endverkaufspreise jedoch stets über den genannten aggregierten Gesamtkosten, so dass auch bei Berücksichtigung eines vollen Lohnanspruchs ein Gewinn erzielt wird. Insgesamt ist ein aufwärtsgerichteter Preistrend für Scheitholz zu beobachten. Wegen der steigenden Nachfrage erhöhte sich der Preis für kurze Scheite seit Ergebungsbeginn (Nov. 2001) im Durchschnitt um ca. 8 €/Rm bei Hartholz und um ca. 3 €/Rm bei Weichholz. Aufgrund des hier gezeigten hohen Lohnkostenanteils an den Gesamtprozesskosten erscheinen damit Maßnahmen, die auf eine höhere Produktivität des Arbeitskräfteeinsatzes abzielen, besonders dazu geeignet, den Preisanstieg zu dämpfen.

9 Summary

Triggered by rising energy prices wood fuel use is currently experiencing a remarkable upward trend. This trend is not only a direct consequence of an increasing number of installations but also it is resulting from the fact, that the fuel is largely being "rediscovered" for existing facilities. Both developments lead to an increasing wood demand. Consequently, log wood fuels are taking profit of this development, too. This fuel type still contributes about 45 % to the bioenergy use in Bavaria.

However, the increasing demand of the recent years has already caused a shortage of "oven-ready" wood logs. In order to avoid such bottlenecks in supply and the consequent rise in prices a rationalisation in wood log production is required. Various processes and a large bandwidth of mechanisation options are in use for the provision of wood logs and therefore a large range of different process chains can be identified. To date these processes have never been systematically investigated, a compilation of planning data or validation criteria is therefore still unavailable. This refers to both, the wood mass related labour and the energy demand of the process; both represent an essential basis for differentiated cost calculations and economical comparisons. But also questions concerning the particular physical or health related impacts of the workers which carry out the more or less hard work of log wood production are yet unregarded. A further lack of knowledge is given for log wood storage, particularly regarding the required storage time for sufficient drying before the energetic use. There is also only little evidence concerning the prevailing dry matter losses during log wood storage. Differentiating calculation factors for converting volumes of equal masses of various piled and unpiled log wood assortments are also missing.

It was therefore the aim of the here presented research to close several knowledge gaps concerning the individual steps in the production of wood logs and to present a number of useful planning data for an optimisation of the whole process chain. This could finally contribute to prevent shortages of this traditional fuel during the currently ongoing rapid market changes.

Specific labour demand. For the performance of extensive time studies during wood harvesting (thinning) and wood log production by axe, various splitters or wood log processors as well as for the staking into bundling frames a PDA-based (Personal Digital Assistant or "handheld computer") method was adopted and combined with a special evaluation software. The method was applied in a total of 40 time studies.

8 studies were performed on wood harvesting by professional and unprofessional wood collectors. Their results show, that the technical working productivity (TP) largely varies between 0,18 and 1,42 solid cubic meters (sc) per man hour, depending on the prevailing work conditions. Apart from the variability of the wood types (here spruce, pine, beech, ash and maple) this was also a function of the variable capacity of the different probands, and it was depending on the applied harvesting method and the forest environment. In average of all studies a productivity of 0,56 sc (with bark) was measured for each man hour. From the collected data a model was elaborated, which allows an estimation of the time demand for wood log harvesting as a function of the mean middle-diameter of the trees.

32 further time studies were made on the upgrading process of wood logs applying practise relevant raw wood assortments. These results show that the prevailing round wood diameters are usu-

ally below the optimum diameters which were determined at maximum productivity, therefore the productivity values as declared by the equipment manufacturers are seldom reached. This applies particularly for the combined sawing and splitting machines, where the given mean diameter of the raw material (here 15,2 cm for small and 25,9 for big machines) is usually far below the optimum diameter. Productivity rises with an increase of the degree of mechanisation, here an increase from 0,49 solid cubic meters (sc) per hour (small vertical splitter) to 6,03 sc/h (large combined cutting and splitting automat).

Temporarily also a splitting by hand (using an axe or splitting hammer) can perform at similar productivity as the small vertical splitter, however it became obvious in the trials that an exhaustion is reached earlier for manual splitting. The subsequent stacking of the split 33 cm logs (without a bundling frame) can be performed at a technical productivity (TP) of 3,0 piled cubic metres per man hour, which applies for both, spruce and beech wood; this is an equivalent of 1,9 solid cubic meters (sc) per hour. Larger differences between wood types were recorded for the smaller combined cutting-splitting automats (1,36 to 3,90 sc/h for beech and spruce, respectively). For these throughput comparisons it should be noted that – apart from the combined machines – the wood still has to be cut separately, either before or after the splitting. This process again requires about the same specific labour input as for the splitting itself. A direct comparison of the here presented upgrading methods is therefore only feasible if all partial productivities of the steps are aggregated to a typical process chain for each equipment (see below: "process chain analysis").

Work intensity analysis. Measurements concerning work intensity should always be conducted while the proband remains as much uninfluenced as possible. In order to fulfil this demand a method which was originally developed for the steel industry was here adapted for wood log production, it was the OWAS-method (Ovako Working Posture Analysing System). This method creates an index which is based on a large number of observations concerning the posture of the workers, thus allowing to compare several differing work processes in terms of work intensity. The postures of a single or several working persons are determined according to the multi-moment method. Pictures form digital video recordings over several hours were analysed in increments of 30 seconds. A total of 3891 pictures were thus evaluated, covering all relevant procedures from wood harvesting till the splitting or stacking and loading. Any occasionally required back staff were also observed separately. When the work could be performed in a sitting position (e.g. crane operation, truck driving) no extra evaluation was necessary. An OWAS-index of 100 was uniformly assigned to such operations.

The results show that work intensity is mostly reduced with an increasing mechanisation level. The OWAS-indices of the work intensity for "thinning", "splitting with axe" and "wood fetching" are relatively high at values of L=186, L=179 and L=176. For the procedures "disk sawing", "vertical splitting" and "bundling" they were in a medium range (L=140), while for "horizontal splitting" and the "splitting automat" they were as expected lowest (L=109 to 118). This ranking was also confirmed by a questionnaire among 60 persons. It can be concluded, that any measures for improved mechanisation – particularly the use of a splitting-cutting machine – are useful to achieve improved working conditions and to reduce the partially high work load of the persons involved in wood log processing.

Specific energy consumption. Parallel to the labour time requirements the energy consumption of the processes were also determined in order to achieve a direct assignation of energy consumption to the produced fuel volume. As a result, the splitting by a small vertical machine, for example, consumes about 1,4 to 1,8 kWh of electrical energy per solid cubic meter (sc) of wood. For large vertical or horizontal splitters this consumption can decline to less than one third. However, in practise such machines are often not electrically driven but they are rather connected to the power hook of a tractor for operations in remote areas. This multiplies the energy consumption to values of 5,1 to 15,4 kWh/sc.

Required storage time. For energetic use in furnaces the wood logs shall have a moisture content below 20 %. Drying usually happens during longer storage periods. Such storage periods were investigated in trials with a total of 37 piled cubic meters of spruce, beech and pine wood. For determining the moisture progression the 0,5 m³ bundled wood charges were monthly weighed over a period of 1 or 2 years, respectively. To pay tribute to climatic differences two different storage sites were chosen in Bavaria (Freising and Kempten). Additionally a replication of the trials was made in 2004 (after the "record summer" in 2003), in order to regard annual climatic changes.

The results show, that the moisture content can already fall below the desired 20 % after one year storage period, given that suitable storage conditions are arranged. This applies for beech, spruce and pine wood in equal measure, but it is also true for split and unsplit wood, for covered and uncovered stacks and for storage in either an outdoor or in a roof covered half-open shelter. However, it is important to choose a windy and dry site and to have suitable space between the stacks (space in the trials was 3 m) and to build the piles in sufficient distance to buildings. Such conditions are for example not reached when storage is conducted within a forest or in a garage.

Under such favourable conditions drying of fresh wood already starts just after cutting in the winter months. In a warm summer, as for example in 2003, the target moisture content (MC) of below 20 % is reached in less than 9 month. Differences to a more humid summer (2004) were marginal: the 20 % MC-target was reached only one month later. Major differences between beech, pine and spruce wood did not occur. A maximum monthly moisture loss was consistently given in March (over 90 litres per staked cubic meter). Unsplit wood logs require slightly longer drying time (about 1 or 2 months). Coverage of outdoor piles was favourable until early summer when drying speed picked up for uncovered piles and compensated the delay.

Dry matter losses. By comparison of the initial and final dry matter an estimate of dry matter losses during the 2 year storage period was possible. However, there is some insecurity about the data due to the large variation between the measurements. Nevertheless, a few trends can be demonstrated. The results show, that that dry matter losses are mostly lower in an indoor than in an outdoor storage. For a rough estimate an average loss of 2,6 % (indoor) and 5,7 % (outdoor, covered and uncovered) or a global mean of 4,1 % was found for 1-metre logs over 24 month of storage. The data did however not permit any differentiation between wood species and between split or unsplit wood, therefore the values given above were calculated from all wood species and sizes. This averaging was deemed feasible because the drying performance was also quite uniform for all treatments and species.

Volume conversion factors for assortments. By numerous piling and pouring trials using a standard measuring frame the factors for converting several wood log assortments into the respective volumes of equal masses were determined. This assessment was required because the conventionally used global conversion factor (1 piled m^3 = 0,7 solid m^3) was for scientific purposes not deemed precise enough to be applied on all different assortments and wood species as investigated here. For the piling and pouring trials a total of 12 piled m^3 of beech and spruce logs were used. They were continuously processed after each measurement and thus a total 222 trials were conducted.

The results show, that a piled m^3 of firewood provided as split and piled 1-m-logs is being produced from around 0,50 solid cubic meters (sc) of beech and 0,55 sc of spruce wood, respectively. And there are more significant differences between the wood species and assortments. As an effect the customer of firewood, who orders a piled cubic meter of oven-ready wood which is produced from the original pile of split 1-m-logs, will on delivery as 33-cm short logs receive only 0,81 m^3 (beech) or 0,86 m^3 (spruce), respectively. These figures illustrate, that shorter logs can be stored at less room demand due to the smaller interspaces. Unevenness or bends in the wood are here less effective concerning the build-up of cavities. Compared to round wood the non-uniform cross section of split logs reduces the compactness of the pile. The highest volume differences are given for bulky wood logs, where the conversion factors should be used differentiating for the respective wood species.

Process chain analysis. All previous results concerning individual sub-processes can only be fully evaluated in the context of the other up- or downstream processes. Such an evaluation was performed in an process chain analysis where the different modules were exemplarily combined. Four model process chains ("paths") were defined which cover the bandwidth of all applications from the "free time wood producer" ("path 2") via the forest owner with a low ("path 3") or high ("path 1") mechanisation till the professional wood log supplier ("path 4"). The analysis also aggregates the respective transportation and transshipment steps according to the model definition.

The aggregation of the specific labour time requirement from the forest to the end user displays a total labour time requirement of 3,59 to 0,31 man hours per piled m^3, depending on the degree of mechanisation from path 1 to path 4. The highest value is assigned to the free time producer and the lowest to the professional wood log supplier. The free time producer spends more than half of his work time for the log preparation (sawing and splitting), while in all other model paths this part requires only 30 to 37 % of the total labour time.

In the same way the determined work intensities (OWAS-indices) were analysed for the full process chain by weighted calculation according to the respective time fraction for each sub-process. As expected, the results show, that the highest mechanisation is associated with the lowest work intensity, as measured by the posture of the involved worker. The reverse conclusion is, however, not true, because from path 1 to path 2 a slight increase of work intensity was recorded, despite the higher mechanisation level. This is explained by the fact, that the rather low work intensity for the work at the large vertical splitter (in path 2) is less time consuming, so that the relative share of all other (sometimes heavier) work steps in the process is increased, and this results in their higher weight in the aggregated work intensity calculation.

The individual energy consumption results were also aggregated in the four defined model process chains. As a result the specific total energy consumption per solid cubic meter (sc) of oven-ready fire wood is lowest for the free time producer (path 1). He uses only 8,9 kWh/sc, and this figure could be further reduced by applying an axe instead of a small vertical splitter. Due to the increasing transportation expenditure and the higher mechanisation level the total energy consumption rises in the other three process chains from 12,5 kWh/sc (path 2) and 22,5 kWh/sc (path 3) to 47,4 kWh/sc (path 4) where it finally reaches a five time higher value compared to the free time producer. In all model process chains the transport consumes the largest portion of energy.

However, compared to the energy content of the provided wood logs, the here calculated total energy consumption is rather low. The input/output-ratio for beech wood logs is, for example in path 1, only around 0,0029; this means, that only about 0,3 % of the energy content of wood logs has to be previously invested in the form of a final energy source. For the more energy intensive path 4 this ratio is around 1,6 % (beech) and 2,6 % (spruce), respectively. If instead of the final energy source the so-called "cumulative primary energy consumption" is regarded, which also includes the specific energy demand for the diesel or electricity production and supply, wood log production still remains a particularly favourable process in terms of the energy balance. In this approach the primary energy consumption (based on the German energy system) is around 0,5 to 3,2 % of the wood energy as provided to the end user.

A major goal of the process chain analysis was to determine the total costs of wood log production. Similar to the labour time requirement a positive effect of a higher mechanisation level is here observed for the costs, too. The aggregated total costs in the defined model process chains are 55 € per piled m^3 regarding path 1 ("free time producer") and they decline to 32 €/per piled m^3 in path 3, while in path 4 (professional wood log supplier) they slightly rise again to about 34 €/per piled m^3 (all related to 1 m^3 piled short logs, including 10 €/m^3 for the purchase of the raw material from the forest owner). This cost reduction in path 3 and path 4 is, however, only achievable, if an adequate machine utilisation is reached and if the respective sales volume can be built up. Following the mechanisation level the labour cost fraction in the process chain falls from 92 and 89 % (path 1 and 2) to only 46 and 25 % (path 3 and 4), respectively.

In these calculations mean costs per man hour of 11,46 and 15,24 €/h were assumed for workers or machine operators, respectively. This is, however, not always a useful assumption, because some free time players consider their work in the forest or in the yard rather a useful exercise to compensate for otherwise little physical activity in their job. If then a wage entitlement is not given the total costs in path 1 would significantly decline from 54,52 €/m^3 (33-cm logs incl. raw material purchase) to only 13,52 €/$m^{3;}$ this is because the labour consumption in path 1 is rather high.

Market prices for wood logs. In the frame of this investigation the TFZ also launched a regular price monitoring of wood logs in Germany, beginning in 2002. This questioning is performed every 6 month among 28 suppliers of soft and hard wood (33-cm and 1-m logs). The average price for oven-ready hard wood logs (33 cm) is currently around 70,18 € per piled m^3, while the same wood in a 1-meter format (split) is around 55 €/m^3 (date: July 2006). For soft wood the prices are as expected lower, here the short logs are around 52,26 €/m^3 in average. All prices are

related to the volume of split 1-meter-logs in order to refer to the same wood mass. If the prices are calculated based on the energy content, soft wood is not any more cheaper than hard wood.

In any case the end user prices are well above the here calculated aggregated costs, so that even under full consideration of all labour costs a profit is always made. In general there is a clear upward trend of end consumer prices for wood logs. Since November 2001, when the survey was launched, the mean price for hard wood has risen by about 8 € per piled m^3 (for soft wood about 3 €/m^3). Further price increases can best be attenuated by any measure which improves the labour productivity, as labour costs were here shown to be contributing the highest share to the total production costs.

10 Quellenverzeichnis

[1] ANONYMUS (2004): Gut gelaufen!. Brennstoffspiegel und Mineralölrundschau : deutsches Energiemagazin, Heft 2, S. 35-37

[2] ANONYMUS (2006): AFZ - Der Wald. Jg. 61, Heft 1 (2.1. 2006) ff., Rubrik „Holzmarkt"

[3] ANONYMUS (2006): Vorfahrt für einheimische Festbrennstoffe. Brennstoffspiegel und Mineralölrundschau, Heft 2, S. 44-45

[4] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTWSCHAFT (2006): Wetterdaten des Agrarmeteorologischen Messnetz Bayern. URL: http://www.lfl.bayern.de/agm/start.php

[5] BAYERISCHER WALDBESITZERVERBAND E.V. (1996): "Bayerisch Heizen" – Anschriften bayerischer Brennholzdepots". München: BWV

[6] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1983): Rohholzsortierungsbestimmungen für den Gebrauch im bayerischen Staatswald. München: BStMELF, 33 Seiten

[7] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2004): Land- und Forstwirtschaft in Bayern. Daten und Fakten 2004. München: BStMLF, 24 Seiten, URL: http://www.stmlf-design2.bayern.de/publikationen/agrarpolitik/daten_und_fakten_2004.pdf

[8] BLANK, R.; BOMBOSCH, F.; KRAFT, D.; KÜCHEMANN, W.; LEWARK, S.; MORAT, J.; PETERS, H.; STOLZENBURG, H.-U. (1998): Arbeitsstudien, Arbeitsorganisation und Qualitätsmanagement in der Forstwirtschaft, REFA-Fachausschuß Forstwirtschaft (Hrsg.). REFA-Fachbuchreihe Arbeitsgestaltung, 1. Aufl. Stuttgart: Institut für Arbeitsorganisation e.V., Stuttgart (IfAO), 175 Seiten, ISBN 3-932160-10-X

[9] BRUSCHE, R. (1983): Hackschnitzel aus Schwachholz : Bergung, Lagerung und Trocknung. KTBL-Schrift Nr. 290. Münster: Landwirtschaftsverlag, 96 Seiten

[10] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1983): Schreiben vom 20.09.1983 - 613-7164/4. In: Bayer. Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.): Rohholzsortierungsbestimmungen für den Gebrauch im bayerischen Staatswald, S. 34

[11] BUNDESVERBAND DES DEUTSCHEN GÜTERNAHVERKEHRS E.V. (BDN) (1995): Kostenorientierte unverbindliche Richtpreis-Tabellen. Frankfurt am Main, 32 Seiten

[12] Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungsnetzwerk (C.A.R.M.E.N. e.V.) (2006): Preisinformationen, URL: http://www.carmen-ev.de

[13] DECKER T. (2004): Beurteilung der Arbeitsbelastung bei der Scheitholzbereitstellung mit Hilfe der OWAS-Methode, Diplomarbeit; Technische Universität München, Weihenstephan, Lehrstuhl für Landtechnik. München: TUM, 67 Seiten

[14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1993): DIN EN 322: Holzwerkstoffe, Bestimmung des Feuchtegehalts. Beuth-Verlag

[15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1994): DIN EN 350-2: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz. Beuth-Verlag, Berlin

[16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2005): DIN CEN/TS 14961: Feste Biobrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen; Deutsche Fassung CEN/TS 14961:2005. Berlin: Beuth-Verlag, 42 S.

[17] FAUSTZAHLEN FÜR DIE LANDWIRTSCHAFT (2005): Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (Hrsg.), Darmstadt. Redaktion: Werner Achilles et al., 13. Aufl. Münster : KTBL-Schr.-Vertrieb im Landwirtschaftsverl., 1095 Seiten, ISBN 3-7843-2194-1

[18] FLINTEC GMBH (2002) Betriebsanleitung Wägezelle Flintec UB6 bzw. Hottinger Baldwin U2-2t. Meckesheim: Flintec, Darmstadt: HBM

[19] FREI, D. (1996): Analyse und Bewertung von Körperhaltungen bei der Forstarbeit mit Hilfe der OWAS-Methode; Diplomarbeit. Wien: Universität für Bodenkultur, Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen, 66 Seiten

[20] HARTMANN, H. (2003): Brennstoffeigenschaften und Mengenplanung. In: Hartmann, H. (Hrsg.): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Sonderpublikation der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, S. 51-60

[21] HARTMANN, H. (2003): Kosten der Festbrennstoffnutzung. In: Hartmann, H. (Hrsg.): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Sonderpublikation der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR). Gülzow, S. 127-137

[22] HARTMANN, H. (Hrsg.) (2003): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Sonderpublikation des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR). Gülzow, 84 Seiten

[23] HARTMANN, H.; BÖHM, T. (2004): Physikalisch-mechanische Brennstoffeigenschaften. In: Härtlein, M.; Eltrop, L.; Thrän, D. (Hrsg.): Voraussetzung zur Standardisierung biogener Festbrennstoffe, Teil 2: Mess- und Analyseverfahren. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (Hrsg.), Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Nr. 23. Münster: Landwirtschaftsverlag, S. 558-632

[24] HARTMANN, H.; BÖHM, T.; MAIER, L. (2000): Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – Umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), Reihe "Materialien", Nr. 154. München, 155 S.

[25] HARTMANN, H.; HÖLDRICH, A. (2003): Bereitstellung von Festbrennstoffen. In: Hartmann, H. (Hrsg.): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Sonderpublikation der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR). Gülzow, S. 15-50

[26] HARTMANN, H.; MADEKER, U. (1997): Der Handel mit biogenen Festbrennstoffen – Anbieter, Absatzmengen, Qualitäten, Service, Preise. Landtechnik Weihenstephan (Hrsg.) Landtechnik-Bericht, Nr. 28. Freising: Selbstverlag, 65 Seiten

[27] HARTMANN, H.; THUNEKE, K. (1997): Ernte von Kurzumtriebsplantagen – Maschinenerprobung und Modellbetrachtungen. Landtechnik-Bericht, Nr. 29, Landtechnik Weihenstephan (Hrsg.). Freising: Selbstverlag, 98 Seiten

[28] HILDEBRANDT R. (Hrsg.) (1969): Die Schnittholztrocknung. Oberboihingen: Selbstverlag, 198 S.

[29] HOLZABSATZFONDS - ANSTALT DES ÖFFENTLICHEN RECHTS ; ABSATZFÖRDERUNGSFONDS DER DEUTSCHEN FORST- UND HOLZWIRTSCHAFT (2005): Natürlich HOLZ - die deutsche Forstwirtschaft - Zahlen und Fakten. Bonn, 71 Seiten

[30] HOLZMESSANWEISUNG (1936): Bestimmungen über die Ausformung, Messung und Sortenbildung des Holzes in den deutschen Forsten, vom 1. April 1936. Berlin: Deutscher Holz-Anzeiger, 71 Seiten

[31] INGENIEURBUERO HOLZTECHNIK - HOLZBAU DIPL.-ING.(FH) SI.-ING. JUERGEN DECKER (2005): Holzlexikon. URL: http://www.holz.de/holzlexikon

[32] JACKE (2003): Vorgabe-, Richt- und Planzeiten: Zur abschließenden Nutzung des Erweiterten Sortentarifs (EST). Forst und Holz, Jg. 58, Nr. 23-24, S. 720-722

[33] JONAS, A.; HANEDER, H. (2001): Energie aus Holz – Informationsbroschüre der Landwirtschaftskammern), 8. überarb. Aufl. Niederösterreichische Landes-Landwirtschaftskammer (Hrsg.). St. Pölten: LWK, 76 Seiten

[34] KNIGGE, W.; SCHULZ ; H. (1966): Grundriss der Forstbenutzung. Entstehung, Eigenschaften, Verwertung und Verwendung des Holzes und anderer Forstprodukte. Hamburg u. a.: Parey, S. 284

[35] KOLLMANN, F. (1982): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Band 1, 2. Auflage. Berlin u.a.: Springer Verlag, S. 99, S. 111

[36] KRAMER, H.; AKÇA, A. (1995): Leitfaden zur Waldmesslehre, 3. Aufl. Frankfurt am Main: Sauerländer, 266 Seiten, ISBN 3-7939-0830-6

[37] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (KTBL), Darmstadt (1996): Persönliche Mitteilung aus dem Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL)

[38] LÖFFLER, H. **(**1992): Manuskript zu den Lehrveranstaltungen Arbeitswissenschaft für Studierende der Forstwissenschaft. 3., neubearb. Aufl. Technische Universität München, Fakultät für Forstwissenschaften und Ressourcenmanagement, Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, Weihenstephan, Getr. Zählung

[39] LOHMANN, U. (1993): Holz-Handbuch, 4., völlig überarb. Aufl., 1. Nachdr. Leinfelden-Echterdingen : DRW-Verlag, 312 Seiten, ISBN 3-87181-322-2

[40] LUNDQVIST, P. (1988): Working Environment in Farm Buildings – Results of Studies in Livestock Buildings and Greenhouses. Dissertation. Rapport Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för lantbrukets byggnadsteknik (LBT), Nr. 58. Lund: SLU, 235 Seiten, ISBN 91-576-3372-X

[41] MALL, M. (2003): Verfahren zur Bereitstellung von Scheitholz. Diplomarbeit. Technische Universität München, Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement. Weihenstephan: Selbstverlag, 121 Seiten

[42] MOMBÄCHER, R. (1993): Holzlexikon, A – M., 3. Auflage, 1. Nachdruck. Stuttgart: DRW-Verlag., S. 633

[43] MÖRSCHNER, J.; MARHEINEKE, T.; ELTROP, L. (2002): Ökologische Analyse (I) – Lebenszyklusbetrachtungen. In: Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.): Biomasse als erneuerbarer Energieträger – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen Erneuerbaren Energien. Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe", Band 3 (2. Auflage, Neubearbeitung). Münster: Landwirtschaftsverlag, S. 255-352

[44] Öko-Institut e. V.(2005): Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 4.3., Basisdatenauszug (Exceldatei) auf Anfrage (Stand 05/2005). Darmstadt, , URL: www.gemis.de

[45] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (1998): ÖNORM M 7132 1998-07-01 - Energiewirtschaftliche Nutzung von Holz und Rinde als Brennstoff - Begriffsbestimmungen und Merkmale. Wien: ÖN, 9 Seiten

[46] PAUSCH, R. (2003): Zeitbedarf, Produktivität, Kraftstoffverbrauch und Kosten von Holzerntetechnik, Kalkulationsgrundlagen. In: Felbermeier, B.; Mosandl, R. (Ed.) (2004): Zukunftsorientierte Forstwirtschaft: Entwicklung eines forstlichen Entscheidungsunterstützungssystems (ZEUS) auf der Grundlage von Untersuchungen verschiedener Waldbehandlungsoptionen in Forstbetrieben Mittelschwabens. Ökosystem Management 1, Technische Universität München. Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement. München: Technische Universität, 180 S.

[47] PETERS. H. (1991): Ergonomische und sicherheitstechnische Bewertung von Holzernteverfahren in der Forstwirtschaft – an Beispielen aus Staats- und Kleinprivatwald. Dissertation. München: Ludwig-Maximilians-Universität , Forstwissenschaftlich Fakultät, 193 Seiten

[48] PRODAN, M. (1951); Messung der Waldbestände; Frankfurt am Main: Sauerländer, S. 8

[49] SCHAFFNER, S. (2001): Realisierung von Holzvorräten im Kleinprivatwald. Dissertation. TU München Weihenstephan, Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement am Wissenschaftszentrum für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Lehrstuhl für Forstpolitik und Forstgeschichte. München: Technische Universität, S. 243

[50] STAMPFER, K. (1996): Belastungs- und Beanspruchungsermittlung in verschieden mechanisierten forstlichen Arbeitssystemen. Dissertation. Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Forsttechnik. Schriftenreihe des Instituts für Forsttechnik ; Nr. 3. Wien: Institut für Forsttechnik, 96 Seiten

[51] STOFFERT, G. (1985): Analyse und Einstufung von Körperhaltungen bei der Arbeit nach der OWAS-Methode. Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.). Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, Jg. 39, Nr. 1, S. 31-38

[52] Tampere University of Technology (1996): WinOWAS – A Computerized System for the Analysis of Work Postures. Occupational Safety Engineering. Tampere: University of Technology

[53] TECSON-DIGITAL / TECSON GMBH (2005): Der aktuelle Heizölpreis. URL: http://www.tecson.de/pheizoel.htm

[54] Verein zur Förderung von Maßnahmen für Feuersicherheit und Umweltschutz des Schornsteinfegerhandwerks e.V.(1997): (Hrsg.): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes – Verordnung über Kleinfeuerungsanlagen, 1. BImSchV (kommentierte Fassung). Arbeitsblatt Nr. 601. Essen, 116 S.

[55] WENDL, G. (1992): Reparaturkosten von Landmaschinen. Rationalisierungskuratorium für Landwirtschaft (RKL). Kiel: Selbstverlag, S.1496-1521

[56] WIKIMEDIA DEUTSCHLAND E. V. (2005): Wikipedia, die freie Enzyklopädie. URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Hauptseite

[57] WITTKOPF, S. (2005): Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern. Dissertation.- Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt. München: Selbstverlag, 209 Seiten

[58] WITTKOPF, ST.; HÖMER, U.; FELLER, ST. (2003): Bereitstellungsverfahren für Waldhackschnitzel - Leistung, Kosten, Rahmenbedingungen. Schriftenreihe Berichte der LWF, Nr. 38. Freising: Selbstverlag, 82 Seiten

[59] ZIMMER ELECTRONIC SYSTEMS GMBH (2001): PM390 3 Phasen-Energiemeßgerät ; TM39 3 Phasen-Energiemeßgerät als portables Servicegerät, Benutzerhandbuch, Stand: 07.08. 2001. Oberursel: ZES, 132 Seiten

11 Anhang

11.1 Steckbriefe der einzelnen Zeitstudien

Steckbrief: Arbeitsstudie 1, Holzernte Fichte

Aufnahmedatum	04./05./09. März 2004
Wuchsgebiet	Wuchsbezirk 13.2 „Münchner Schotterebene“, Isar-Auwald, Raum Freising
Bestandesbeschreibung	Baumarten: 75 % Fichte, 25 % Esche Alter: 25 – 50 Jahre Nutzungs-/Durchforstungsart: Jungdurchforstung (JD)
Kenndaten	Ausscheidender Bestand Mittlerer BHD: 11,22 cm Mittlerer MDM: 8,81 cm Mittleres Rohschaftvolumen: 0,0649 Fm m.R.
Erschließung	Mittlere Entfernung zur Rückegasse: 8,8 m
Behinderungen	Bewuchs: keine Behinderung auf 95 % der Fläche, 5 % mit behinderndem Bewuchs Gelände: keine Behinderung auf 100 % der Fläche Durchschnittliche Hangneigung: 0 % Witterung/Wettereinflüsse: keine Behinderung
Arbeitskräfte	Arbeiter: männlich, 30 Jahre, komplette Schutz- und Arbeitsausrüstung vorhanden
Maschinenausstattung	Motorsäge: Stihl 020; 1,6 kW
Arbeitsverfahren	Motormanuelle Fällung und Entastung Vermessen mit Hilfe eines Rollmaßbandes Ablängen auf 1-Meter-Stücke, kein Spalten Vorlieferung bis zur Rückegasse, Abholung des Holzes erfolgt zu späterem Zeitpunkt

Tabelle 46: Kennwerte zu den gemessenen Zeitanteilen in Studie 1

Arbeitsablauf-abschnitt	Summe (min)	Anzahl (N)	Mittel (min)	Minimum (min)	Maximum (min)	Standard-abweichung (min)
Gehen	38,95	85	0,46	0,03	2,73	0,50
Freischneiden	16,53	69	0,24	0,03	0,83	0,14
Fällen	86,78	97	0,89	0,15	9,43	1,13
Asten/Ablängen	302,62	96	3,15	0,55	8,52	1,42
Vorliefern	198,92	11	18,08	7,78	33,08	8,42
Sonstige	9,12	3	3,04	0,08	5,00	2,60
Rüsten	16,42	6	2,74	1,53	5,25	1,33
SVZ	45,92	14	3,28	0,22	6,58	2,51
PVZ	33,58	9	3,73	0,07	11,37	4,00
Gesamtergebnis	748,84	390	1,92	0,03	33,08	3,53

Steckbrief: Arbeitsstudien 2 und 3, Holzernte Fichte

Aufnahmedatum	28. Februar 2004
Wuchsbezirk	Wuchsgebiet 13.2 „Münchner Schotterebene“, Isar-Auwald, Raum Freising
Bestandesbeschreibung	Baumarten: 95 % Fichte mit Laubholz-Unterstand, 5 % Laubholz Alter: 40 Jahre Nutzungs-/Durchforstungsart: Jungdurchforstung (JD), partiell Altdurchforstung (AD)
Kenndaten	Ausscheidender Bestand Mittlerer BHD: Arbeitsstudie 2: 11,21 cm, Arbeitsstudie 3: 12,83 cm Mittlerer MDM: Arbeitsstudie 2: 8,64 cm, Arbeitsstudie 3: 10,45 cm Mittleres Rohschaftvolumen (in Fm m. R.): Arbeitsstudie 2: 0,0821, Arbeitsstudie 3: 0,1384
Erschließung	Mittlere Entfernung zur Rückegasse: 10 – 15 m
Behinderungen	Bewuchs: keine Behinderung auf 100 % der Fläche Gelände: keine Behinderung auf 100 % der Fläche Durchschnittliche Hangneigung: 0 % Witterung/Wettereinflüsse: behindernder Schnee im Kronenraum und auf dem Boden Temperatur: -10 °C
Arbeitskräfte	Arbeiter Studie 2: männlich, 31 Jahre, komplette Schutz-/Arbeitsausrüstung vorhanden Arbeiter Studie 3: männlich, 41 Jahre, komplette Schutz-/Arbeitsausrüstung vorhanden
Maschinenausstattung	Schlepper mit Seilwinde (MB-Truc) Motorsäge Arbeiter 1: Stihl 026 Motorsäge Arbeiter 2: Stihl 026
Arbeitsverfahren	Motormanuelle Fällung und Entastung durch beide Arbeiter getrennt voneinander Vermessen mit Hilfe eines Rollmaßbandes Ablängen auf 2-Meter-Stücke, kein Spalten Vorlieferung bis zur Rückegasse

Tabelle 47: Kennwerte zu den gemessenen Zeitanteilen in Studie 2

Arbeitsablauf-abschnitt	Summe (min)	Anzahl (N)	Mittel (min)	Minimum (min)	Maximum (min)	Standard-abweichung (min)
Gehen	13,20	46	0,29	0,05	2,02	0,40
Freischneiden	18,88	35	0,54	0,07	5,00	0,94
Fällen	42,15	50	0,84	0,15	3,32	0,71
Asten/Ablängen	154,40	47	3,29	0,42	6,85	1,63
Vorliefern	66,15	10	6,62	0,27	20,17	6,37
Rüsten	15,03	3	5,01	3,38	6,22	1,46
SVZ	14,70	10	1,47	0,15	7,05	2,03
PVZ	21,15	7	3,02	0,38	12,02	4,21
Gesamtergebnis	345,67	208	1,66	0,05	20,17	2,48

Tabelle 48: Kennwerte zu den gemessenen Zeitanteilen in Studie 3

Arbeitsablauf-abschnitt	Summe (min)	Anzahl (N)	Mittel (min)	Minimum (min)	Maximum (min)	Standard-abweichung (min)
Gehen	11,23	18	0,62	0,08	2,20	0,65
Freischneiden	4,60	7	0,62	0,08	2,20	0,65
Fällen	36,33	41	0,89	0,12	3,18	0,74
Asten/Ablängen	185,50	41	4,52	0,93	11,15	2,19
Vorliefern	57,28	8	7,16	0,67	30,05	10,27
Sonstige	1,80	1	1,80	1,80	1,80	
Rüsten	14,58	2	7,29	7,13	7,45	0,22
SVZ	8,50	8	1,06	0,10	2,20	0,74
PVZ	10,78	4	2,70	1,58	4,80	1,51
Gesamtergebnis	330,62	130	2,54	0,08	30,05	3,49

Steckbrief: Arbeitsstudie 4, Holzernte Fichte

Aufnahmedatum	07. Februar 2004
Wuchsgebiet	Wuchsbezirk 12.7 „Mittelschwäbisches Schotterriedel- und Hügelland“, Landkreis Neu-Ulm
Bestandesbeschreibung	Baumarten: 95 % Fichte, 5 % Laubholz Nutzungs-/Durchforstungsart: JD
Kenndaten	Ausscheidender Bestand Mittlerer BHD: 9,75 cm Mittlerer MDM: 8 cm Mittleres Rohschaftvolumen: 0,0464 Fm m.R.
Erschließung	Mittlere Entfernung zur Rückegasse: 15 m Vorlieferentfernung: 50 – 55 m
Behinderungen	Bewuchs: keine Behinderung auf 100 % der Fläche Gelände: keine Behinderung auf 100 % der Fläche Durchschnittliche Hangneigung: 0 % Witterung/Wettereinflüsse: keine Behinderung
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, 35 Jahre mit kompletter Schutzausrüstung
Maschinenausstattung	Hobby-Entastungssäge (< 3 kW) Pkw mit Anhänger
Arbeitsverfahren	Motormanuelle Fällung und Entastung Ablängen auf 2,5-Meter-Stücke, kein Spalten Vorlieferung bis zum Pkw-befahrbaren Waldweg, Abholung des Holzes erfolgt zu späterem Zeitpunkt

Tabelle 49: Kennwerte zu den gemessenen Zeitanteilen in Studie 4

Arbeitsablauf-abschnitt	Summe (min)	Anzahl (N)	Mittel (min)	Minimum (min)	Maximum (min)	Standard-abweichung (min)
Gehen	2,53	11	0,23	0,07	0,78	0,25
Freischneiden	0,07	1	0,07	0,07	0,07	
Fällen	12,45	11	1,13	0,22	2,78	0,84
Asten/Ablängen	28,35	13	2,18	1,10	4,02	0,90
Vorliefern	45,42	1	45,42	45,42	45,42	
Sonstige	19,30	3	6,43	0,33	14,78	7,48
SVZ	12,52	2	6,26	2,68	9,83	5,06
PVZ	11,42	1	11,42	11,42	11,42	
Gesamtergebnis	132,06	43	3,07	0,07	45,42	7,27

Steckbrief: Arbeitsstudie 5, Holzernte Kiefer

Aufnahmedatum	20. Dezember 2003
Wuchsgebiet	Wuchsbezirk 13.2 „Münchner Schotterebene“, Isar-Auwald, Raum Freising
Bestandesbeschreibung	Baumarten: 90 % Kiefer, 10 % Laubholz, einzelne Fichte Alter: 25 – 30 Jahre Nutzungs-/Durchforstungsart: JD
Kenndaten	Ausscheidender Bestand Mittlerer BHD: 10,28 cm Mittlerer MDM: 8,33 cm Mittleres Rohschaftvolumen: 0,0439 Fm m.R.
Erschließung	Mittlere Entfernung zur Rückegasse: 10 – 15 m
Behinderungen	Bewuchs: dichter, behindernder Bewuchs über mannshoch bis 3 m auf 100 % der Fläche Gelände: keine Behinderung auf 100 % der Fläche Durchschnittliche Hangneigung: 0 % Witterung/Wettereinflüsse: keine Behinderung
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, 57 Jahre, MS-Führer, komplette Schutz-/Arbeitsausrüstung vorhanden Arbeiter 2: männlich, 58 Jahre, Mithilfe beim Ablängen sowie Vorliefern und Beladen
Maschinenausstattung	Motorsäge Stihl 026 Jeep mit Seilwinde und Anhänger
Arbeitsverfahren	Motormanuelle Fällung und Entastung Ablängen auf 1-Meter-Stücke, kein Spalten Vorlieferung bis zur Rückegasse, eine Teilmenge wurde auf einen kleinen Autoanhänger verladen Zufallbringen z. T. mit Unterstützung der Seilwinde

Tabelle 50: Kennwerte zu den gemessenen Zeitanteilen in Studie 5

Arbeitsablauf-abschnitt	Summe (min)	Anzahl (N)	Mittel (min)	Minimum (min)	Maximum (min)	Standard-abweichung (min)
Gehen	7,25	16	0,45	0,03	2,22	0,63
Freischneiden	5,00	5	1,00	0,62	1,88	0,52
Fällen	17,58	18	0,98	0,12	3,00	0,79
Asten/Ablängen	56,67	18	3,15	0,65	6,22	1,87
Seilarbeit	19,37	1	19,37	19,37	19,37	
Rüsten	6,18	2	3,09	2,82	3,37	0,39
SVZ	11,10	3	3,70	2,02	6,47	2,41
PVZ	12,03	4	3,01	0,15	8,52	3,76
Gesamtergebnis	135,18	67	2,02	0,03	19,37	2,84

Steckbrief: Arbeitsstudie 6, Holzernte Kiefer

Aufnahmedatum	20. Dezember 2003
Wuchsgebiet	Wuchsbezirk 13.2 „Münchner Schotterebene“, Isar-Auwald, Raum Freising
Bestandesbeschreibung	Baumarten: 70 % Kiefer, 20 % Fichte, 10 % Laubholz Nutzungs-/Durchforstungsart: JD
Kenndaten	Ausscheidender Bestand Mittlerer BHD: 6,96 cm Mittlerer MDM: 5,46 cm Mittleres Rohschaftvolumen: 0,0243 Fm m.R.
Erschließung	Mittlere Entfernung zur Rückegasse: 10 m
Behinderungen	Bewuchs: dichter, behindernder Bewuchs knie- bis mannshoch auf 20 % der Fläche (Schlinggewächse), dichter behinderndér Bewuchs über mannshoch bis 3m auf 50 % der Fläche (Schlinggewächse), dichter, behindernder Unterstand auf 15 % der Fläche Gelände: keine Behinderung auf 100 % der Fläche Durchschnittliche Hangneigung: 0 % Witterung/Wettereinflüsse: keine Behinderung
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, 65 Jahre, MS-Führer, Schutz-/Arbeitsausrüstung vorhanden, aber Helm ohne Visier und Gehörschutz Arbeiter 2: männlich, 40 Jahre, Vorliefern, keine Schutz-/Arbeitsausrüstung, nur Schnittschutzstiefel Arbeiter 3: weiblich, 75 Jahre, Vorliefern, keine Schutz-/Arbeitsausrüstung
Maschinenausstattung	Traktor mit Hänger, MS Stihl 026
Arbeitsverfahren	Motormanuelle Fällung und Entastung Ablängen auf 2-Meter-Stücke (Fluchtstab als Maßeinheit), kein Spalten Vorliefern zur Rückegasse, anschließendes Aufladen auf Hänger

Tabelle 51: Kennwerte zu den gemessenen Zeitanteilen in Studie 6

Arbeitsablauf-abschnitt	Summe (min)	Anzahl (N)	Mittel (min)	Minimum (min)	Maximum (min)
Gehen	16,90	77	0,22	0,03	1,60
Freischneiden	19,08	24	0,80	0,07	2,20
Fällen	55,73	113	0,49	0,10	3,53
Asten/Ablängen	181,42	124	1,46	0,08	5,00
Vorliefern	31,98	46	0,70	0,08	4,08
Laden	36,33	21	1,73	0,15	6,22
Sonstige	12,48	3	4,16	1,08	7,78
Störung	8,02	2	4,01	3,32	4,70
SVZ	42,40	46	0,92	0,07	8,07
PVZ	21,63	18	1,20	0,07	6,33
Gesamtergebnis	435,80	480	0,91	0,03	8,07

Steckbrief: Arbeitsstudie 7 Holzernte Ahorn, Buche

Aufnahmedatum	05./06. Januar 2005
Wuchsgebiet	Wuchsbezirk 6.5 „Oberpfälzer Jurarand“, Raum Regensburg
Bestandesbeschreibung	Baumarten: 60 % Bergahorn, 40 % Buche Alter: 45 Jahre Nutzungs-/Durchforstungsart: JD, teilweise Übergang zur AD
Kenndaten	Ausscheidender Bestand Mittlerer BHD: 16,61 cm Mittlerer MDM: 13,43 cm Mittleres Rohschaftvolumen: 0,21 Fm m.R.
Erschließung	Mittlere Entfernung zur Rückegasse: 30 m
Behinderungen	Bewuchs: keine Behinderung auf 100 % der Fläche Gelände: keine Behinderung auf 100 % der Fläche Durchschnittliche Hangneigung: 11 %, partiell deutlich höher Witterung/Wettereinflüsse: regnerisch, Nässe führt zu erhöhter Rutschgefahr in den Hangpartien
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, 50 Jahre, MS-Führer, komplette Schutz-/Arbeitsausrüstung vorhanden Arbeiter 2: männlich, 20 Jahre, Vorliefern, keine Schutz-/Arbeitsausrüstung, nur Schnittschutzstiefel
Maschinenausstattung	Motorsäge: Stihl 036
Arbeitsverfahren	Motormanuelle Fällung und Entastung Kein Ablängen der Bäume im Hangbereich, Bäume werden zu einem späteren Zeitpunkt aus dem Hang geseilt und an der Forststraße abgelängt Vorliefern des Astmaterials bis zur Forststraße Zusammentragen des Reisigmaterials auf Haufen

Tabelle 52: Kennwerte zu den gemessenen Zeitanteilen in Studie 7

Arbeitsablauf-abschnitt	Summe (min)	Anzahl (N)	Mittel (min)	Minimum (min)	Maximum (min)	Standard-abweichung (min)
Gehen	39,68	23	1,73	0,38	3,38	0,88
Freischneiden	92,98	22	4,23	1,98	9,27	2,11
Fällen	32,60	23	1,42	0,47	2,72	0,57
Asten/Ablängen	178,12	23	7,74	3,13	11,72	2,35
Vorliefern	96,55	22	4,39	1,23	9,63	2,67
Rüsten	12,60	5	2,52	1,00	5,35	1,80
SVZ	19,35	6	3,23	0,85	5,75	1,83
PVZ	15,47	11	1,41	0,45	2,83	0,75
Gesamtergebnis	487,35	135	3,61	0,38	11,72	2,85

Steckbrief: Arbeitsstudie 8, Holzernte Esche

Aufnahmedatum	21.02.2004
Wuchsgebiet	Wuchsbezirk 13.2 „Münchner Schotterebene“, Isar-Auwald, Raum Freising
Bestandesbeschreibung	Baumarten: 75 % Esche, 25 % Erle, Ahorn im Unterstand Alter: 40 – 80 Jahre (Eschen), 30 – 40 Jahre (Erlen) Nutzungs-/Durchforstungsart: AD, partiell VJ
Kenndaten	Ausscheidender Bestand Mittlerer BHD: 22,3 cm Mittlerer MDM: 16,65 cm Mittleres Rohschaftvolumen: 0,44 Fm m.R.
Erschließung	Mittlere Entfernung zur Rückegasse: 25 m
Behinderungen	Bewuchs: keine Behinderung auf 100 % der Fläche Gelände: keine Behinderung auf 65 % der Fläche, 35 % der Fläche durch Gräben durchzogen Durchschnittliche Hangneigung: 0 % Witterung/Wettereinflüsse: keine Behinderung
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, 31 Jahre, komplette Schutz-/Arbeitsausrüstung vorhanden Arbeiter 2: männlich, 41 Jahre, komplette Schutz-/Arbeitsausrüstung vorhanden
Maschinenausstattung	Schlepper mit Seilwinde (MB-Truck) Motorsäge Arbeiter 1: Stihl 035 Motorsäge Arbeiter 2: Stihl 035
Arbeitsverfahren	Motormanuelle Fällung und Entastung durch beide Arbeiter getrennt voneinander, dabei Vermessen mit Hilfe eines Rollmaßbandes Ablängen auf 1-Meter-Stücke, kein Spalten Vorlieferung bis zur Rückegasse, Abholung des Holzes erfolgt zu späterem Zeitpunkt Herausseilen der Stämme aus dem Inneren des Bestandes bzw. der Stämme aus dem Bereich der Gräben bis zur Rückegasse und anschließende Aufarbeitung (1-Meter-Stücke, ungespalten)

Tabelle 53: Kennwerte zu den gemessenen Zeitanteilen in Studie 8

Arbeitsablauf-abschnitt	Summe (min)	Anzahl (N)	Mittel (min)	Minimum (min)	Maximum (min)	Standard-abweichung (min)
Gehen	14,30	13	1,10	0,05	4,35	1,35
Freischneiden	3,42	7	0,49	0,17	1,30	0,41
Fällen	32,17	17	1,89	0,27	8,57	2,29
Asten/Ablängen	150,75	17	8,87	2,68	41,25	9,94
Vorliefern	44,17	16	2,76	0,10	7,98	2,54
Seilarbeit	40,25	5	8,05	4,28	13,02	4,05
Rüsten	5,70	3	1,90	1,18	3,13	1,07
SVZ	14,28	6	2,38	0,17	4,50	1,68
PVZ	8,50	5	1,70	0,18	5,13	2,16
Gesamtergebnis	313,53	89	3,52	0,05	41,25	5,54

Steckbrief: Arbeitsstudie ks 1, Spalten mit dem kleinen Senkrechtspalter

Aufnahmedatum	23. April 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Senkrechtspalter: Elektra Beckum 6 SD Spaltdruck: 6 t Elektrischer Antrieb: 3 kW
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 85 Mittlerer Mittendurchmesser: 13,38cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:02 Stunden Mittlere Zyklusdauer: 00:43,9 Mittlere Leistungsaufnahme: 0,53 kW
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Diplom Forstwirt Alter: 28 Jahre Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 33 cm Lager: lose geschüttet liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: lose geschüttet liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Steckbrief: Arbeitsstudie ks 2, Spalten mit dem kleinen Senkrechtspalter

Aufnahmedatum	23. April 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Senkrechtspalter: Elektra Beckum SD 6 Spaltdruck: 6 t Elektrischer Antrieb: 3 kW
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 38 Mittlerer Mittendurchmesser: 13,73 cm Effektiv untersuchte Zeit: 00:51 Stunden Mittlere Zyklusdauer: 01:20,6 Mittlere Leistungsaufnahme: 0,53 kW
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Diplom Forstwirt Alter: 28 Jahre Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 33 cm Lager: lose geschüttet liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: lose geschüttet liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Steckbrief: Arbeitsstudie ks 3, Spalten mit dem kleinen Senkrechtspalter

Aufnahmedatum	27. Oktober 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Senkrechtspalter: Elektra Beckum SD 6 Spaltdruck: 6 t Elektrischer Antrieb: 3 kW
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 152 Mittlerer Mittendurchmesser: 11,93 cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:12 Stunden Mittlere Zyklusdauer: 00:28,4 Mittlere Leistungsaufnahme: 0,68 kW
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Diplom Forstwirt Alter: 28 Jahre Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 33 cm Lager: lose geschüttet liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: lose geschüttet liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Steckbrief: Arbeitstudie ks 4, Spalten mit dem kleinen Senkrechtspalter

Aufnahmedatum	27. Oktober 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Senkrechtspalter: Elektra Beckum SD 6 Spaltdruck: 6 t Elektrischer Antrieb: 3 kW
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 128 Mittlerer Mittendurchmesser: 12,94 cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:04 Stunden Mittlere Zyklusdauer: 00:30,4 Mittlere Leistungsaufnahme: 0,63 kW
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Diplom Forstwirt Alter: 28 Jahre Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 33 cm Lager: lose geschüttet liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: lose geschüttet liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Steckbrief: Arbeitsstudie ks 5, Spalten mit dem kleinen Senkrechtspalter

Aufnahmedatum	28. Oktober 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Senkrechtspalter: Elektra Beckum SD 6 Spaltdruck: 6 t Elektrischer Antrieb: 3 kW
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 182 Mittlerer Mittendurchmesser: 11,45 cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:43 Stunden Mittlere Zyklusdauer: 00:33,9 Mittlere Leistungsaufnahme: 0,70 kW
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Diplom Forstwirt Alter: 28 Jahre Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 33 cm Lager: lose geschüttet liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: lose geschüttet liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Steckbrief: Arbeitsstudie ks 6, Spalten mit dem kleinen Senkrechtspalter

Aufnahmedatum	28. Oktober 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Senkrechtspalter: Elektra Beckum SD 6 Spaltdruck: 6 t Elektrischer Antrieb: 3 kW
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 166 Mittlerer Mittendurchmesser: 11,45 cm Effektiv untersuchte Zeit: 00:59 Stunden Mittlere Zyklusdauer: 00:21,4 Mittlere Leistungsaufnahme: 0,72 kW
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Diplom Forstwirt Alter: 28 Jahre Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 33 cm Lager: lose geschüttet liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: lose geschüttet liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Steckbrief: Arbeitsstudie GS 1, Spalten mit dem großen Senkrechtspalter

Aufnahmedatum	25. November 2003
Standort	Versuchshofgut Dürnast bei Freising
Gerätetyp	Senkrechtspalter: Edora mit Spaltkreuz (vier Enden) Spaltdruck: 16 t Zapfwellenantrieb Schlepper: Fendt 308 LSA 57 kW (78 PS)
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 162 Mittlerer Mittendurchmesser: 17,01 cm Effektiv untersuchte Zeit: 02:20 Stunden Energieverbrauch: 2,4 l/h Dieselkraftstoff
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Diplom Forstwirt Alter: 28 Jahre Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 1 Meter Lager: gestapelt liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: gestapelt liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Steckbrief: Arbeitsstudie GS 2, Spalten mit dem großen Senkrechtspalter

Aufnahmedatum	24. November 2003
Standort	Versuchshofgut Dürnast bei Freising
Gerätetyp	Senkrechtspalter: Edora mit Spaltkreuz (vier Enden) Spaltdruck: 16 t Zapfwellenantrieb Schlepper: Fendt 308 LSA 57 kW (78 PS)
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 119 Mittlerer Mittendurchmesser: 18,76 cm Effektiv untersuchte Zeit: 02:19 Stunden Energieverbrauch: 2,4 l/h Dieselkraftstoff
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Diplom Forstwirt Alter: 28 Jahre Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 1 Meter Lager: gestapelt liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: gestapelt liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Steckbrief: Arbeitsstudie GS 3, Spalten mit dem großen Senkrechtspalter

Aufnahmedatum	14. Mai 2004
Standort	Landwirtschaftlicher Betrieb in Pönning
Gerätetyp	Senkrechtspalter: Vogesenblitz Spaltdruck: 25 t Extra: Hat eine Variable Haltekralle zum Fixieren der Rundlinge Zapfwellenantrieb Schlepper: MF 294 S, 55 kW (75 PS)
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 167 Mittlerer Mittendurchmesser: 18,31 cm Effektiv untersuchte Zeit: 02:36 Stunden Energieverbrauch: 1,72 l/h Dieselkraftstoff
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Student Agrarwissenschaft, Landwirt Alter: 24 Jahre Größe: 1,65 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 1 Meter Lager: lose liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: lose liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Steckbrief: Arbeitsstudie GS 4, Spalten mit dem großen Senkrechtspalter

Aufnahmedatum	13. April 2004
Standort	Forststraße (Wald in Freising)
Gerätetyp	Senkrechtspalter: Edora Spaltdruck: 12 t Zapfwellenantrieb Schlepper: Steyr
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 123 Mittlerer Mittendurchmesser: 20,38 cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:42 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, Forstarbeiter, Alter: 45 Jahre, Größe: 1,75 m Arbeiter 2: männlich, Forstarbeiter, Alter 55 Jahre, Größe 1,73 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: Spaltet das Rundholz mit der Länge 1 Meter, holt es dabei vom Lager, welches gestapelt liegende Rundlinge in ca. 2 m Entfernung der Forststraße enthält und legt das gespaltene Holz in unmittelbarer Nähe ab. Arbeiter 2: nimmt das lose liegende Holz und stapelt es auf einem Anhänger, trägt hin und wieder entfernter liegende Rundlinge bei.

Steckbrief: Arbeitsstudie GS 5, Spalten mit dem großen Senkrechtspalter

Aufnahmedatum	14. April 2004
Standort	Forststraße (Wald in Freising)
Gerätetyp	Senkrechtspalter: Edora Spaltdruck: 12 t Zapfwellenantrieb Schlepper: Steyr
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 168 Mittlerer Mittendurchmesser: 25,81 cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:12 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, Forstarbeiter, Alter: 45 Jahre, Größe: 1,75 m Arbeiter 2: männlich, Forstarbeiter, Alter 55 Jahre, Größe 1,73 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: Spaltet das Rundholz mit der Länge 1 Meter, holt es dabei vom Lager, welches gestapelt liegende Rundlinge in ca. 1 m Entfernung der Forststraße enthält und legt das gespaltene Holz in unmittelbarer Nähe ab. Arbeiter 2: nimmt das lose liegende Holz und stapelt es auf einem Anhänger, trägt hin und wieder entfernter liegende Rundlinge bei.

Steckbrief: Arbeitsstudie GS 6, Spalten mit dem großen Senkrechtspalter

Aufnahmedatum	26. April 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Senkrechtspalter: Edora Spaltdruck: 12 t Elektrischer Antrieb der Hydraulik: 4 kW
Kenndaten	Baumart: gemischt Anzahl Rundlinge: 280 Effektiv untersuchte Zeit: 02:21 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, Forstarbeiter, Alter: 45 Jahre, Größe: 1,75 m Arbeiter 2: männlich 55, Größe 1,73 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: Spaltet das Rundholz mit der Länge 1 Meter, holt es dabei vom Lager, welches gestapelt liegende Rundlinge in ca. 1 m Entfernung enthält und legt das gespaltene Holz in unmittelbarer Nähe ab. Arbeiter 2: nimmt das lose liegende Holz und stapelt es, trägt hin und wieder entfernter liegende Rundlinge bei.

Steckbrief: Arbeitsstudie WS 1, Spalten mit dem großen Waagrechtspalter

Aufnahmedatum	16. April 2003
Standort	Landwirtschaftlicher Betrieb in Scheyern
Gerätetyp	Waagrechtspalter: BGU SP 30 HZH Spaltdruck: 30 t Antrieb über Zapfwelle, Schlepper 68 PS Energieverbrauch: 1,21 l/h Dieselkraftstoff
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 225 Mittlerer Mittendurchmesser: Effektiv untersuchte Zeit: 01:59 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, Landwirt, Alter: 65 Jahre, Größe: 1,68 m Arbeiter 2: männlich Landwirt, Alter: 24 Jahre, Größe: 1,78 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: Spaltet das Rundholz mit der Länge 1 Meter, holt es dabei vom Lager, welches lose liegende Rundlinge in ca. 1 m Entfernung enthält. Lässt das Holz hinten einfach fallen und muss daher den Schlepper mit dem Spalter zweimal versetzen. Arbeiter 2: führt entfernter liegende Rundlinge bei. Räumt hin- und wieder die Ablagefläche hinter dem Spaltkreuz frei

Steckbrief: Arbeitsstudie WS 2, Spalten mit dem großen Waagrechtspalter

Aufnahmedatum	04. Juni 2003
Standort	Landwirtschaftlicher Betrieb in Scheyern
Gerätetyp	Waagrechtspalter: BGU SP 30 HZH Spaltdruck: 30 t Antrieb über Zapfwelle, Schlepper 50 kW (68 PS)
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 142 Mittlerer Mittendurchmesser: Effektiv untersuchte Zeit: 01:15 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, Landwirt, Alter: 26 Jahre, Größe: 1,75 m Arbeiter 2: männlich Landwirt, Alter: 24 Jahre, Größe: 1,78 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: Spaltet das Rundholz mit der Länge 1 Meter, holt es dabei vom Lager, welches lose liegende Rundlinge in ca. 1 m Entfernung enthält. Lässt das Holz hinten einfach fallen und muss daher den Schlepper mit dem Spalter zweimal versetzen. Arbeiter 2: führt entfernter liegende Rundlinge bei. Räumt hin- und wieder die Ablagefläche hinter dem Spaltkreuz frei

Steckbrief: Arbeitsstudie WS 3, Spalten mit dem großen Waagrechtspalter

Aufnahmedatum	17. April 2004
Standort	Landwirtschaftlicher Betrieb in Nandlstadt
Gerätetyp	Waagrechtspalter: POSCH Hydro-Max Spaltdruck: 24 t Antrieb über Zapfwelle, Schlepper: Schlüter 1250
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 142 Mittlerer Mittendurchmesser: Effektiv untersuchte Zeit: 02:30 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, Landwirt, Alter: 53 Jahre, Größe: 1,75 m Arbeiter 2: männlich, Landwirt, Alter: 24 Jahre, Größe: 1,78 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: Spaltet das Rundholz mit der Länge 1 Meter, holt es dabei vom Lager, welches lose liegende Rundlinge in ca. 1 m Entfernung enthält und lässt das gespaltene Holz in eine Auffangwanne fallen. Arbeiter 2: nimmt das lose liegende Holz aus der Wanne und stapelt es, trägt entfernter liegende Rundlinge bei und verkürzte so den Weg vom Lager zum Spalter.

Steckbrief: Arbeitsstudie kk 1, Sägen und Spalten mit der kleinen kombinierten Säge-spaltmaschine

Aufnahmedatum	20. Februar 2004
Standort	Betriebsgelände Aufarbeitungsplatz
Gerätetyp	Kombinierte Säge-Spaltmaschine: Hakki Pilke 2x easy Spaltdruck: 58 kN Installierte Motornennleistung: 7,5 kW Max. Durchmesser: 30 cm Säge: Kettensägeschwert 13“ Schnittlänge: bis 60 cm Angabe Hersteller Produktivität: 10 – 12 Rm/h Gemessene mittlere TAP hier : 4,0 Rm/h
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 71 Mittlerer Mittendurchmesser: 14,65 cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:55 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Zimmermann Alter: 28 Jahre, Größe: 1,87 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: sägt und spaltet das Rundholz durch Bedienen des kombinierten Säge-Spaltgerätes. Er befördert dabei das Rundholz vom Lagergestell auf das Förderband, bedient Vorschub und Sägen. Das Gerät spaltet und befördert dann automatisch das 33 cm lange und gespaltene Holz in Gitterboxen. Sind die Gitterboxen voll, so werden diese vom Arbeiter mit Hilfe eines Gabelstaplers gegen leere ausgetauscht. Arbeiter 2: bringt die Rundlinge mit Hilfe eines Baggers mit einer Klemmzange auf das Vorratsgestell beim Förderband. (Geht nicht in die Bewertung mit ein.)

Steckbrief: Arbeitsstudie kk 2, Sägen und Spalten mit der kleinen kombinierten Säge-spaltmaschine

Aufnahmedatum	2003*
Standort	Betriebsgelände Aufarbeitungsplatz
Gerätetyp	Kombinierte Säge-Spaltmaschine: Hakki Pilke 2x easy Spaltdruck: 58 kN Installierte Motornennleistung: 7,5 kW Max. Durchmesser: 30 cm Säge: Kettensägeschwert 13“ Schnittlänge: bis 60 cm Angabe Hersteller Produktivität: 10 – 12 Rm/h Gemessene mittlere TAP hier : 8,2 Rm/h
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 61 Mittlerer Mittendurchmesser: 17,44 cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:16 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Arbeiter Alter: 50 Jahre, Größe: 1,75 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: sägt und spaltet das Rundholz durch Bedienen des kombinierten Säge-Spaltgerätes. Er befördert dabei das Rundholz vom Lagergestell auf das Förderband, bedient Vorschub und Sägen. Das Gerät spaltet und befördert dann automatisch das 33 cm lange und gespaltene Holz in Gitterboxen. Sind die Gitterboxen voll, so werden diese vom Arbeiter mit Hilfe eines Gabelstaplers gegen leere ausgetauscht. Arbeiter 2: bringt die Rundlinge mit Hilfe eines Baggers mit einer Klemmzange auf das Vorratsgestell beim Förderband. (Geht nicht in die Bewertung mit ein.)

* Nach Mall (eigene Auswertung)

Steckbrief: Arbeitsstudie kk 3, Sägen und Spalten mit der kleinen kombinierten Säge-spaltmaschine

Aufnahmedatum	12. August 2003
Standort	Forststraße im Auwald bei Freising
Gerätetyp	Kombinierte Säge-Spaltmaschine: Posch Spaltfix 300 Spaltdruck: 11 t Antrieb über Zapfwelle Schlepper Max. Durchmesser: 28 cm Säge: Kreissägeblatt Durchmesser 750 mm Schnittlänge: 20 cm bis 50 cm
Kenndaten	Baumart: Esche Anzahl Rundlinge: 83 Mittlerer Mittendurchmesser: 17,73 cm Effektiv untersuchte Zeit: 02:16 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, Landwirt, Alter: 53 Jahre, Größe: 1,75 m Arbeiter 2: männlich, Arbeiter, Alter: 55 Jahre, Größe 1,73 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: sägt und spaltet das Rundholz durch Bedienen des kombinierten Säge-Spaltgerätes. Er fördert dabei das Rundholz bis zum Anschlag und bedient dann Vorschub und Sägen. Das Gerät spaltet und befördert dann automatisch das 33 cm lange und gespaltene Holz auf einen Anhänger. Arbeiter 2: bringt die Rundlinge bei und legt sie auf das Förderband. Bewegt den Anhänger für ein gleichmäßiges Befüllen.

Steckbrief: Arbeitsstudie kk 4, Sägen und Spalten mit der kleinen kombinierten Säge-spaltmaschine

Aufnahmedatum	12. August 2003
Standort	Forststraße im Auwald bei Freising
Gerätetyp	Kombinierte Säge-Spaltmaschine: Posch Spaltfix 300 Spaltdruck: 11 t Antrieb über Zapfwelle Schlepper Max. Durchmesser: 28 cm Säge: Kreissägeblatt Durchmesser 750 mm Schnittlänge: 20 cm bis 50 cm
Kenndaten	Baumart: Esche Anzahl Rundlinge: 72 Mittlerer Mittendurchmesser: 14,86 cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:12 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, Landwirt, Alter: 53 Jahre, Größe: 1,75 m Arbeiter 2: männlich, Arbeiter, Alter: 55 Jahre, Größe 1,73 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: sägt und spaltet das Rundholz durch Bedienen des kombinierten Säge-Spaltgerätes. Er fördert dabei das Rundholz bis zum Anschlag und bedient dann Vorschub und Sägen. Das Gerät spaltet und befördert dann automatisch das 33 cm lange und gespaltene Holz auf einen Anhänger. Arbeiter 2: bringt die Rundlinge bei und legt sie auf das Förderband. Bewegt den Anhänger für ein gleichmäßiges Befüllen.

Steckbrief: Arbeitsstudie kk 5, Sägen und Spalten mit der kleinen kombinierten Säge-spaltmaschine

Aufnahmedatum	2003*
Standort	Aufarbeitungsplatz im Wald bei Freising
Gerätetyp	Kombinierte Säge-Spaltmaschine: PALAX Combi TSV E Kraftübertragung über Zapfwelle eines Schleppers Max. Durchmesser: 25 cm Säge: Kreissägeblatt Durchmesser 700 mm Wipptisch Schnittlänge: 25 cm bis 60 cm
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 207 Mittlerer Mittendurchmesser: 11,19 cm Effektiv untersuchte Zeit: 02:05 Stunden
Arbeitskräfte	Eine Arbeiterin, weiblich, Größe: 1,70 m
Arbeitsverfahren	Die Arbeiterin sägt und spaltet das Rundholz durch Bedienen des kombinierten Säge-Spaltgerätes. Sie hebt die Rundlinge auf das Förderband von einem ca. 1m entfernten hoch liegenden Holzlager, fördert dann das Rundholz bis zum Anschlag und bedient weiter Vorschub und Sägen. Das Gerät spaltet und befördert dann automatisch das 33 cm lange und gespaltene Holz in ein Lagerbehälter.

- Nach Mall (eigene Auswertung)

Steckbrief: Arbeitsstudie GK 1, Sägen und Spalten mit der großen kombinierten Säge-spaltmaschine

Aufnahmedatum	19. Dezember 2003
Standort	Betriebsgelände Aufarbeitungsplatz (Biomassehof Allgäu)
Gerätetyp	Kombinierte Säge-Spaltmaschine: Kretzer Herkules II Spaltdruck: 27 t Antrieb elektrisch 40 kW Max. Durchmesser: 45 cm Säge: Kettensäge Schnittlänge: 20 cm bis 50 cm
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 57 Mittlerer Mittendurchmesser: 24,98 cm Mittlere Rundlinglänge: 7,14 m Effektiv untersuchte Zeit: 02:59 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Alter: 43 Jahre, Größe: 1,76 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: sägt und spaltet das Rundholz durch Bedienen des kombinierten Säge-Spaltgerätes. Alles automatisch, nur Kontrollfunktion, beheben von Störungen, wechseln der Gitterboxen. Arbeiter 2: bringt die Rundlinge mit einem Bagger (Greifzange) bei und legt sie auf das Zuführgestell. Gelegentlich Hilfe beim Wechseln der Gitterbox. (Geht nicht in die Bewertung mit ein.)

Steckbrief: Arbeitsstudie GK 2, Sägen und Spalten mit der großen kombinierten Säge-spaltmaschine

Aufnahmedatum	2003*
Standort	Betriebsgelände Aufarbeitungsplatz (Biomassehof Allgäu)
Gerätetyp	Kombinierte Säge-Spaltmaschine: Kretzer Herkules II Spaltdruck: 27 t Antrieb elektrisch 40 kW Max. Durchmesser: 45 cm Säge: Kettensäge Schnittlänge: 20 cm bis 50 cm
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 79 Mittlerer Mittendurchmesser: 22,84 cm Mittlere Rundlinglänge: 7,03 m Effektiv untersuchte Zeit: 04:22 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Alter: 43 Jahre, Größe: 1,76 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: sägt und spaltet das Rundholz durch Bedienen des kombinierten Säge-Spaltgerätes. Alles automatisch, nur Kontrollfunktion, beheben von Störungen, wechseln der Gitterboxen. Arbeiter 2: bringt die Rundlinge mit einem Bagger (Greifzange) bei und legt sie auf das Zuführgestell. Gelegentlich Hilfe beim Wechseln der Gitterbox. (Geht nicht in die Bewertung mit ein.)

- Nach Mall (eigene Auswertung)

Steckbrief: Arbeitsstudie GK 3, Sägen und Spalten mit der großen kombinierten Säge-spaltmaschine

Aufnahmedatum	18. Mai 2004
Standort	Aufarbeitungsplatz Forstservice Haugg
Gerätetyp	Kombinierte Säge-Spaltmaschine: S&Ü SSA 650 Spaltdruck: 50 t Antrieb Dieselaggregat: Deutz F6L914 124 kW Max. Durchmesser: 65 cm Säge: Kettensäge 900 mm Schwertlänge Schnittlänge: 20 cm bis 65 cm Scheitlänge: 20 cm bis 1 m Verbrauch: 9,9 l/h; 2,03 l/Fm
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 47 Mittlerer Mittendurchmesser: 29,85 cm Mittlere Rundlinglänge: 4,43 m Effektiv untersuchte Zeit: 03:10 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Alter: 35 Jahre, Größe: 1,85 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: sägt und spaltet das Rundholz durch Bedienen des kombinierten Säge-Spaltgerätes. Alles automatisch, nur Kontrollfunktion, beheben von Störungen. Arbeiter 2: bringt die Rundlinge mit einem Bagger (Greifzange) bei und legt sie auf das Zuführgestell. (Geht nicht in die Bewertung mit ein.)

Steckbrief: Arbeitsstudie KR 1, Sägen der Scheite mit der Wippkreissäge

Aufnahmedatum	19. September 2003
Standort	Landwirtschaftlicher Betrieb Haslauer Scheyern
Gerätetyp	Wippkreissäge: BGU WK 771 Durchmesser Sägeblatt: 700 mm Antrieb elektrisch: 5,2 kW Max. Durchmesser: 26 cm Verbrauch: 0,37 kWh/Rm
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Scheite: 677 Mittlerer Mittendurchmesser: gespalten Effektiv untersuchte Zeit: 02:26 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Alter: 28 Jahre, Größe: 1,78 m
Arbeitsverfahren	Der Arbeiter sägt Fichten-Meterscheite auf 33 cm Länge. Er holt sie vom ca. 2 m entfernten Lager, bei dem die Scheite geschichtet sind und wirft die kurzen Scheite auf einen Anhänger.

Steckbrief: Arbeitsstudie KR 2, Sägen der Rundlinge mit der Wippkreissäge

Aufnahmedatum	26. Oktober 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Wippkreissäge: Elektra Beckum BW 750 Durchmesser Sägeblatt: 75 cm Antrieb elektrisch: 4,0 kW Max. Durchmesser: 30 cm Verbrauch: 0,66 kWh/Fm
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Scheite: 109 Mittlerer Mittendurchmesser: 11,72 Effektiv untersuchte Zeit: 00:46 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Alter: 30 Jahre, Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Der Arbeiter sägt 1 m lange Fichten-Rundlinge auf 33 cm Länge. Er holt sie vom ca. 1 m entfernten Lager, bei dem die Rundlinge geschichtet sind und wirft die kurzen Rundlinge ungeordnet auf ein ca. 1 m entferntes Lager.

Steckbrief: Arbeitsstudie KR 3, Sägen der Rundlinge mit der Wippkreissäge

Aufnahmedatum	26. Oktober 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Wippkreissäge: Elektra Beckum BW 750 Durchmesser Sägeblatt: 75 cm Antrieb elektrisch: 4,0 kW Max. Durchmesser: 30 cm Verbrauch: 0,84 kWh/Fm
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Scheite: 94 Mittlerer Mittendurchmesser: 11,47 cm Effektiv untersuchte Zeit: 00:50 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Dipl. Forstwirt, Alter: 30 Jahre, Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Der Arbeiter sägt 1 m lange Buchen-Rundlinge auf 33 cm Länge. Er holt sie vom ca. 1 m entfernten Lager, bei dem die Rundlinge geschichtet sind und wirft die kurzen Rundlinge ungeordnet auf ein ca. 1 m entferntes Lager.

Steckbrief: Arbeitsstudie KR 4, Sägen der Rundlinge mit der Wippkreissäge

Aufnahmedatum	13. Mai 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Wippkreissäge: Elektra Beckum BW 750 Durchmesser Sägeblatt: 75 cm Antrieb elektrisch: 4,0 kW Max. Durchmesser: 30 cm Verbrauch: 0,30 kWh/Rm
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Scheite: 129 Mittlerer Mittendurchmesser: gespalten Effektiv untersuchte Zeit: 00:40 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Techniker, Alter: 33 Jahre, Größe: 1,85 m
Arbeitsverfahren	Der Arbeiter sägt gespaltene 1 m lange Fichten-Scheite auf 33 cm Länge. Er holt sie vom ca. 1 m entfernten kreuzweise geschichteten Lager und lässt die 33 cm langen Scheite nach dem Sägen auf ein in unmittelbarer Nähe befindliches Förderband fallen, das die Scheite in eine Gitterbox befördert.

Steckbrief: Arbeitsstudie KR 5, Sägen der Rundlinge mit der Wippkreissäge

Aufnahmedatum	13. Mai 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Wippkreissäge: Elektra Beckum BW 750 Durchmesser Sägeblatt: 75 cm Antrieb elektrisch: 4,0 kW Max. Durchmesser: 30 cm Verbrauch: 0,30 kWh/Rm
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Scheite: 154 Mittlerer Mittendurchmesser: gespalten Effektiv untersuchte Zeit: 01:00 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Techniker Alter: 33 Jahre, Größe: 1,85 m
Arbeitsverfahren	Der Arbeiter sägt gespaltene 1 m lange Buchen-Scheite auf 33 cm Länge. Er holt sie vom ca. 1 m entfernten kreuzweise geschichteten Lager und lässt die 33 cm langen Scheite nach dem Sägen auf ein in unmittelbarer Nähe befindliches Förderband fallen, das die Scheite in eine Gitterbox befördert.

Steckbrief: Arbeitsstudie SC 1, Bündeln mit der Bündelhilfe

Aufnahmedatum	09. April 2003
Standort	Forschungshofgut Dürnast bei Freising
Gerätetyp	Bündelhilfe Woodpack 0,5 Rm
Kenndaten	Baumart: Buche und Fichte gemischt Effektiv untersuchte Zeit: 01:19:21 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1, männlich, Techniker, Alter: 28 Jahre, Größe: 1,78 m Arbeiter 2, männlich, Praktikant, Alter: 20 Jahre, Größe: 1,73 m
Arbeitsverfahren	Beide Arbeiter bündeln das 1 m lange Scheitholz mit einer einzelnen Bündelhilfe zu Rundbündel mit dem Inhalt 0,5 Rm. Dazu wird das Holz in den Rahmen der Bündelhilfe gestapelt. Danach werden die Scheite zusammengezurrt und verschnürt. Anschließend werden die Bügel der Bündelhilfe geöffnet und das runde Holzbündel so zur Seite hin aus dem Gestell gekippt, dass es herausrollt. Danach wird die Bündelhilfe vor das nächste zu bündelnde Holz gestellt, die Bügel wieder verschlossen, um das nächste Bündel zu erstellen.

Steckbrief: Arbeitsstudie SC 2, Bündeln mit der Bündelhilfe

Aufnahmedatum	07. Mai 2003
Standort	Lagerhalle der Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Bündelhilfe Woodpack 1 Rm
Kenndaten	Baumart: Buche und Fichte gemischt Effektiv untersuchte Zeit: 01:37:58 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter 1, männlich, Dipl. Forstwirt, Alter: 34 Jahre, Größe: 1,68 m
Arbeitsverfahren	Der Arbeiter bündelt das 1 m lange Scheitholz mit der Bündelhilfe zu Rundbündel mit dem Inhalt 1 Rm. Dazu wird das Holz in den Rahmen der Bündelhilfe gestapelt. Danach werden die Scheite zusammengezurrt und verschnürt. Anschließend werden die Bügel der Bündelhilfe geöffnet und das runde Holzbündel so zur Seite hin aus dem Gestell gekippt, dass es herausrollt. Danach wird die Bündelhilfe vor das nächste zu bündelnde Holz gestellt, die Bügel wieder verschlossen, um das nächste Bündel zu erstellen.

Steckbrief: Arbeitsstudie SC 3, Holz schichten ohne Bündelhilfe

Aufnahmedatum	29. Oktober 2004
Standort	Betriebsgelände der Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Keiner; 33 cm lange Scheite ohne Bündelhilfe schichten
Kenndaten	Baumart: Buche und Fichte gemischt Effektiv untersuchte Zeit: 04:49:00 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1, männlich, Dipl. Forstwirt, Alter: 31 Jahre, Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Der Arbeiter schichtet 33 cm Scheite ohne Bündelhilfe. Er holt die Scheite von einem ca. 1 m entfernt liegenden Lager, in dem die Scheite lose ca. 1 m hoch aufgehäuft liegen.

Steckbrief: Arbeitsstudie SC 4, Holz in Lagerbehälter werfen

Aufnahmedatum	30. Oktober 2004
Standort	Betriebsgelände der Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Keiner; 33 cm lange Scheite in einen Lagerbehälter werfen. Der Lagerbehälter ist eine Gitterbox bestehend aus Baustahl auf einer Gitterbox. Die Höhe beträgt 2 m.
Kenndaten	Baumart: Buche und Fichte gemischt Effektiv untersuchte Zeit: 01:16:30 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1, männlich, Dipl. Forstwirt, Alter: 31 Jahre, Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Der Arbeiter wirft 33 cm Scheite in den 2 m hohen Lagerbehälter. Er holt die Scheite von einem ca. 1 m entfernt liegenden Lager, in dem die Scheite lose ca. 1 m hoch aufgehäuft liegen

11.2 Fragebogen für die Selbstwerber im Staatswald bei Freising

1. Arbeiten Sie das Holz nur für den eigenen Bedarf auf?

   ☐ ja ☐ nur Verkauf/Nachbarhilfe ☐ teils/teils

2. Wenn ja, welche Feuerung versorgen Sie damit?

   ☐ Kaminofen ☐ Kachelofen ☐ Zentralheizung ☐ Heizungsherd

3. Welche Baumart(en) arbeiten Sie im Herbst/Winter 2003/04 als Selbstwerber im Staatswald mengenmäßig vorrangig auf? (Mehrfachnennung möglich)

   ☐ Fichte ☐ Buche ☐ Eiche ☐ Pappel ☐ Sonstige:___________

4. Was arbeiten Sie i. d. R. auf?

   ☐ Hiebsreste, Kronen, Käferholz im Bestand ☐ (Jung)Durchforstungen

   ☐ gerücktes Holz an der Waldstraße ☐ Sonstiges:___________

5. Auf welche Länge arbeiten Sie im Wald auf?

   ☐ 1 m ☐ 50 cm ☐ 33 cm ☐ 25 cm ☐ Sonstige:_________

6. Welche Scheitlänge hat Ihr Endprodukt?:

   ☐ 1 m ☐ 50 cm ☐ 33 cm ☐ 25 cm ☐ Sonstige:____

7. Wie viel Raummeter Scheitholz machen Sie durchschnittlich pro Jahr?

   ca. _____________ Raummeter (Ster)

8. Wo setzen Sie das Holz zum Abtransport aus dem Wald auf?

   ☐ Bestand ☐ Rückegasse ☐ Waldstraße ☐ gar nicht

9. Wo spalten Sie das Holz verbrauchsfertig?

   ☐ Bestand ☐ Rückegasse ☐ Waldstraße ☐ Lagerplatz zu Hause ☐ gar nicht

10. Wo lagern Sie das Holz, um es verbrauchsfertig zu trocknen?

    ☐ Bestand ☐ Rückegasse ☐ Waldstraße ☐ Lagerplatz zu Hause ☐ gar nicht

11. Wie lange trocknen Sie das Holz insgesamt, bevor Sie es verfeuern?

    Hartholz: ☐ 0,5 Jahre ☐ 1 Jahr ☐ 1,5 Jahre ☐ 2 Jahre ☐ mehr als 2 Jahre

    Weichholz: ☐ 0,5 Jahre ☐ 1 Jahr ☐ 1,5 Jahre ☐ 2 Jahre ☐ mehr als 2 Jahre

12. Wie oft müssen Sie in den Wald, um die jährlich benötigte Brennholzmenge aufzuarbeiten?

    ☐ bis 2 mal ☐ 3-5 mal ☐ mehr als 5 mal

13. Seit wie viel Jahren arbeiten Sie im Wald Brennholz auf?

☐ 1-2 Jahre ☐ 3-5 Jahre ☐ mehr als 5 Jahre

14. Wie viele Personen sind zusätzlich im Regelfall bei der Arbeit im Wald beteiligt?

☐ keine weiteren Personen ☐ 1 Person ☐ 2 Personen ☐ mehr als 2 Personen

15. Welche Maschinen verwenden Sie zur Aufarbeitung im Wald?

☐ Motorsäge ☐ Schlepper ☐ Seilwinde ☐ Sonstige:______________

16. Wie transportieren Sie das Holz aus dem Bestand an die Rückegasse?

☐ händisch ☐ mit Seil ☐ Sonstiges:_____________

17. Wie transportieren sie das Holz an die Waldstraße?

☐ PKW+ Anhänger ☐ Schlepper+Anhänger ☐ Sonstiges:___________________

18. Wie transportieren Sie das Holz an den Lagerplatz?

☐ PKW+ Anhänger ☐ Schlepper+Anhänger ☐ Sonstiges:___________________

19. Welche Maschinen setzen Sie beim Spalten und Einteilen ein?

☐ Spalthammer ☐ Axt ☐ Spalter waagrechter ☐ Spalter senkrecht ☐ Kreissäge

☐ Kombinierte Säge-Spaltmaschinen ☐ Motorsäge ☐ Sonstige:____________

20. Wie hoch schätzen Sie Ihren durchschnittlichen Zeitbedarf, den Sie benötigen, damit 1 Ster Brennholz (1 m Länge) im Wald zum Abtransport bereit gestellt ist.

___________ h (Angabe in Gesamtarbeitsstunden)

Weitere freiwillige Angaben

Für das Projekt „Rationelle Scheitholzbereitstellung“ benötigen wir Personen, deren Arbeitsablauf wir mit einer Studie begleiten möchten. Falls Sie sich dazu bereit erklären würden, bitten wir um Ihren Namen und um Ihre Telefonnummer. Bei Angabe der Adresse werden Ihnen zusätzlich die Ergebnisse dieser Studie als Leitfaden zugesandt.

Name :___________________________________

Telefon: ___________________________________

Adresse: ___________________________________

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit !

11.3 Gewichte verschiedener Raummeterbündel

Tabelle 54: Theoretische Werte für die Gewichte der Raummeterbündel[a]

Fichten Raummeter aus gespaltenen Scheiten	254,61 kg
Buchen Raummeter aus gespaltenen Scheiten	383,18 kg
Kiefern Raummeter aus gespaltenen Scheiten	316,17 kg
Fichten Raummeter aus ungespaltenen Rundlingen	306,48 kg
Buchen Raummeter aus ungespaltenen Rundlingen	469,20 kg

[a] (berechnet für 15 % Wassergehalt bei folgenden Rohdichten: Fichte 0,41 g/cm³ Buche 0,68 g/cm³ Kiefer 0,51 g/cm³)

Tabelle 55: Gemessene Gewichte der Raummeterbündel[b] aus dem Lagerversuch

Baumart	Lagerort	Ausgangsform	Anzahl	Mittelwert Gewicht [kg]	Min [kg]	Max [kg]	Standardabweichung
Fichte	Freising	Scheite gespalten	*10*	314,97	*298,09*	*333,68*	*12,93*
Buche	Freising	Scheite gespalten	*10*	414,76	*377,12*	*454,89*	*22,06*
Kiefer	Freising	Scheite gespalten	*6*	325,33	*304,69*	*341,89*	*13,33*
Fichte	Freising	Rundlinge ungespalten	*4*	345,90	*328,90*	*364,02*	*15,26*
Buche	Freising	Rundlinge ungespalten	*6*	453,59	*419,84*	*471,17*	*19,44*
Fichte	Kempten	Scheite gespalten	*6*	245,96	*235,68*	*252,28*	*6,71*
Buche	Kempten	Scheite gespalten	*6*	368,89	*357,60*	*380,88*	*9,20*
Fichte	Freising erweitert	Scheite gespalten	*8*	242,66	*232,44*	*263,19*	*9,42*
Buche	Freising erweitert	Scheite gespalten	*8*	373,22	*348,30*	*397,04*	*17,89*
Buche	Kempten erweitert	Scheite gespalten	*4*	326,28	*320,74*	*333,23*	*6,16*

[b] (umgerechnet auf 1 Rm mit 15 % Wassergehalt)

11.4 Tabellen der Volumenbestimmungsergebnisse

Tabelle 56: Variationskoeffizient (%) der Volumenmessungen

	VK (%) Buche	VK (%) Fichte
Festmeter	-	-
Rundlinge geschichtet	2,37	1,04
1 m gekreuzt geschichtet, gespalten	-	-
1 m geschichtet, gespalten	1,36	1,94
33 cm geschichtet, gespalten	0,79	0,79
33 cm geschüttet, Gitterbox	3,08	2,14
33 cm geschüttet, Messrahmen	1,03	1,51

Tabelle 57: Ergebnis Volumenbestimmung Fichte (alle Volumina beziehen sich auf 1 Fm)

	April						Oktober					
Fichte	Mittelwert	Min	Max	Stabw	Anzahl	VK (%)	Mittelwert	Min	Max	Stabw	Anzahl	VK (%)
Festmeter	1	*1*	*1*	*0*	*6*	*0*	1	*1*	*1*	*0*	*2*	*0*
Rundlinge geschichtet	1,57	*1,44*	*1,71*	*0,11*	*6*	*6,93*	1,50	*1,40*	*1,59*	*0,13*	*2*	*8,92*
1 m gekreuzt geschichtet, gespalten	2,29	*2,08*	*2,48*	*0,16*	*4*	*7,13*	-	-	-	-	-	-
1 m geschichtet, gespalten	1,80	*1,64*	*1,92*	*0,12*	*4*	*6,46*	-	-	-	-	-	-
33 cm geschichtet, gespalten	1,52	*1,45*	*1,60*	*0,10*	*4*	*6,84*	1,54	*1,51*	*1,56*	*0,03*	*2*	*2,11*
33 cm geschüttet, Gitterbox	2,50	*2,39*	*2,62*	*0,17*	*4*	*6,75*	2,46	*2,42*	*2,49*	*0,05*	*2*	*2,19*
33 cm geschüttet, Messrahmen	2,39	*2,24*	*2,53*	*0,21*	*4*	*8,63*	2,56	*2,52*	*2,61*	*0,06*	*2*	*2,35*

Tabelle 58: Ergebnis Volumenbestimmung Buche (alle Volumina beziehen sich auf 1 Fm)

	April						Oktober					
Buche	Mittel-wert	Min	Max	Stabw	An-zahl	VK (%)	Mittel-wert	Min	Max	Stabw	An-zahl	VK (%)
Festmeter	1	*1*	*1*	*0*	*6*	*0*	1	*1*	*1*	*0*	*2*	*0*
Rundlinge geschichtet	1,70	*1,55*	*1,90*	*0,14*	*6*	*8,14*	1,74	*1,60*	*1,87*	*0,19*	*2*	*10,91*
1 m gekreuzt geschichtet, gespalten	2,40	*2,04*	*2,75*	*0,29*	*4*	*12,05*	-	-	-	-	-	-
1 m geschich-tet, gespalten	2,01	*1,84*	*2,23*	*0,18*	*4*	*9,04*	-	-	-	-	-	-
33 cm ge-schichtet, ge-spalten	1,60	*1,46*	*1,74*	*0,20*	*4*	*12,53*	1,63	*1,52*	*1,75*	*0,16*	*2*	*9,75*
33 cm geschüt-tet, Gitterbox	2,34	*2,16*	*2,52*	*0,26*	*4*	*10,99*	2,39	*2,26*	*2,52*	*0,19*	*2*	*7,78*
33 cm geschüt-tet, Messrah-men	2,24	*2,07*	*2,41*	*0,24*	*4*	*10,83*	2,53	*2,40*	*2,67*	*0,194*	*2*	*7,67*

Berichte im Rahmen dieser Schriftenreihe

Berichte aus dem TFZ:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
2	Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
5	Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
6	Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
7	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöltauglichen Motoren
8	Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
9	Maize as Energy Crop for Combustion - Agricultural Optimisation of Fuel Supply
10	Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
11	Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren



ISSN 1614-1008